



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

GENILTON DE FRANÇA BARROS FILHO

TÉCNICAS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS ALIADAS À
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE
ESTRUTURAL DE EQUIPAMENTOS OFFSHORE DA INDÚSTRIA DE
PETRÓLEO E GÁS NATURAL

JOÃO PESSOA – PB

2018

GENILTON DE FRANÇA BARROS FILHO

**TÉCNICAS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS ALIADAS À
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE
ESTRUTURAL DE EQUIPAMENTOS OFFSHORE DA INDÚSTRIA DE
PETRÓLEO E GÁS NATURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Koje Daniel Vasconcelos Mishina

JOÃO PESSOA – PB

2018

F481t Filho, Genilton de França Barros.

Técnicas de ensaios não destrutivos aliadas à inteligência artificial para avaliação da integridade estrutural de equipamentos offshore da indústria de petróleo e gás natural / Genilton de França Barros Filho. – João Pessoa, 2018.

61 f. : il.

Orientação: Koje Daniel Vasconcelos Mishina.
Monografia (Graduação) – UFPB/CT.

1. Engenharia Mecânica 2. Ensaio não destrutivo. 3. Rede neural artificial 4. Corrosão 5. Dutos. I. Mishina, Koje Daniel Vasconcelos. II. Título.

UFPB/BC

GENILTON DE FRANÇA BARROS FILHO

**TÉCNICAS DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS ALIADAS À
INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL PARA AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE
ESTRUTURAL DE EQUIPAMENTOS OFFSHORE DA INDÚSTRIA DE
PETRÓLEO E GÁS NATURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso – TCC, apresentado à banca examinadora do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba como parte das exigências à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica, tendo obtido o conceito **APROVADO** conforme a apreciação da banca examinadora:

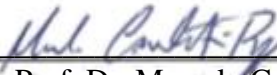
João Pessoa, 02 de julho de 2018

BANCA EXAMINADORA



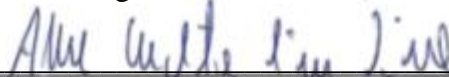
Prof. Dr. Koje Daniel Vasconcelos Mishina

Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia / UFPB



Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti Rodrigues

Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia / UFPB



Prof. Dr. Abel Cavalcante Lima Filho

Departamento de Engenharia Mecânica / Centro de Tecnologia / UFPB

Dedico este trabalho à minha mãe, a meu pai e aos meus irmãos pelo apoio, incentivo, paciência e dedicação durante minha trajetória na universidade.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pois sem ele nem a conclusão do curso e nem a finalização deste trabalho seriam possíveis.

À minha família, por todo o suporte. Aos meus pais Maria Eliza e Genilton de França pelo estímulo de nunca desistir e sempre continuar lutando. Aos meus irmãos Manoel Neto, Daniel Pinto e Davi Pinto pelos momentos de diversão e alegria.

Ao Prof. Dr. Koje Daniel, pela orientação, sugestões, suporte teórico e zelo no trato da matéria.

Ao Prof. Dr. Marcelo Cavalcanti, por abrir as portas do Laboratório de Integridade e Inspeção da UFPB e pela disposição em auxiliar nos aspectos técnicos, teóricos e experimentais deste trabalho.

Ao Prof. Dr. Abel Lima, pela disponibilidade em ajudar sempre que preciso.

À Gilsivan Cartaxo, técnico do Laboratório de Integridade e Inspeção, pela prontidão e auxílio na parte experimental.

Ao GPii (Grupo de Pesquisa em Integridade e Inspeção) pela imersão no mundo da pesquisa e desenvolvimento tecnológico.

À Gessé Paulo, Melquisedeque Gomes, David Domingos e Alysson Silvestre que contribuíram direta ou indiretamente na execução deste projeto.

Aos meus amigos de curso, Dener Delmiro, Lucas Vicente, Thalles Emmanuel, Thalita França, Igor Xavier, João Vinícius e meu amigo de longa data Gustavo Chaves, pela amizade, pelos momentos de descontração e pelo companheirismo durante o período da graduação.

Ao apoio do Programa de Recursos Humanos (PRH – 54) da ANP / MCTI (Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis / Ministério da Ciência, tecnologia e Inovação).

“O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo.

Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos,
no mínimo fará coisas admiráveis”

(José de Alencar)

RESUMO

A presença de descontinuidades em tubulações pode acarretar no vazamento de petróleo e/ou seus derivados, prejudicando o transporte dessas substâncias, trazendo prejuízos econômicos e causando poluição ao meio ambiente. Com essa preocupação, os Ensaios Não Destrutivos (END) estão conseguindo uma posição de destaque nas indústrias petroquímicas para detecção da redução de espessura dos dutos devido o fenômeno de corrosão. No presente trabalho, foi aplicada tanto a técnica de ultrassom quanto o ensaio magnético com sensor Hall para determinação da integridade de dutos. Para isso foi utilizado um duto de aço médio carbono, confeccionado de modo a apresentar furos internos de diferentes profundidades, simulando diferentes graus de severidade (níveis de corrosão). Estes ENDs foram aliados a Redes Neurais Artificiais (RNAs), com o objetivo de facilitar a inspeção, agilizá-la e diminuir a necessidade de profissionais muito qualificados, permitindo uma maior acessibilidade dessas técnicas. As RNAs desenvolvidas recebem as informações dos ENDs e fornecem como resposta a espessura da região em análise, indicando se houve ou não redução de espessura, e o quanto reduziu, informando a existência ou não do fenômeno de corrosão. Elas são capazes de localizar as descontinuidades e determinar em qual profundidade elas se encontram. Outra verificação interessante foi o fato da importância de usar mais de um END, pois um auxilia o outro nas suas limitações, permitindo abranger um maior campo de aplicações.

Palavras-Chave: Ensaio Não Destrutivo (END). Rede Neural Artificial (RNA). Corrosão. Dutos.

ABSTRACT

Presence of discontinuities in pipelines can lead to the leakage of oil and/or its derivatives, damaging the transport of these substances, causing economic losses and causing pollution to the environment. With this concern, Non-Destructive Testing (NDT) is achieving a prominent position in the petrochemical industry to detect the reduction of pipeline thickness due to the corrosion phenomenon. In the present work, both the ultrasound technique and the magnetic test with Hall sensor were used to determine the integrity of the ducts. In order to do this, a medium carbon steel duct was used, in order to present internal holes of different depths, simulating different degrees of severity (corrosion levels). These NDTs were allied to Artificial Neural Networks (ANNs), with the objective of facilitating inspection, streamlining it and reducing the need for highly qualified professionals, allowing a greater accessibility of these techniques. The developed RNAs receive the information from the NDTs and provide as a response the thickness of the region under analysis, indicating whether or not there was a reduction in thickness, and how much it reduced, informing the existence or not of the phenomenon of corrosion. They are able to locate the discontinuities and determine how deep they are. Another interesting check was the fact of the importance of using more than one NDT, because one helps the other in its limitations, allowing to cover a greater field of applications.

Keywords: Non-Destructive Testing (NDT). Artificial Neural Network (ANN). Corrosion. Pipelines.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Campo de Audibilidade das Vibrações Mecânicas.....	15
Figura 2 – Inspeção de materiais por ultrassom. (a) Transmissão da onda ultrassônica e (b) sua recepção.	21
Figura 3 – Cristal piezelétrico (a) sem a ação do campo elétrico e (b) com a ação do campo elétrico.	22
Figura 4 – Aspecto geométrico do feixe sônico.	25
Figura 5 – Princípio do efeito Hall, (a) sem campo magnético e (b) com campo magnético. .	27
Figura 6 – Fita de cobre percorrida por uma corrente I é submetida a um campo magnético B . (a) Situação logo depois que o campo magnético é aplicado, mostrando a trajetória curva de um elétron. (b) Situação após o equilíbrio ser atingido, o que acontece rapidamente.	28
Figura 7 – Neurônio biológico.....	31
Figura 8 – Modelo de um neurônio artificial.....	31
Figura 9 – Camadas de uma RNA.	32
Figura 10 – Ilustração do algoritmo Backpropagation, onde ad indica a saída desejada, a indica a saída obtida, e representa o erro e p representa os dados de entrada.....	34
Figura 11 – Formas de corrosão.	36
Figura 12 – Duto de aço médio carbono.....	37
Figura 13 – Ensaio Não Destrutivo (END) de ultrassom.	39
Figura 14 – Exemplo de um sinal ultrassônico.	40
Figura 15 – Bloco de calibração V1.	41
Figura 16 – Bloco padrão V1 e numeração das regiões utilizadas para medição.	41
Figura 17 – Configuração experimental do ensaio não destrutivo (END), contendo: computador; arduíno; solenoide; fonte de alimentação (CC); sensor Hall e amostra.	42
Figura 18 – Sensor Hall fixado na face do núcleo do solenoide.	43
Figura 19 – Modelo da RNA desenvolvida para ensaios de ultrassom.	45
Figura 20 – Gerador dos dados de treinamento para ultrassom.	45
Figura 21 – Comportamento da RNA de ultrassom.	46
Figura 22 – Interface gráfica para inspeção por ultrassom com uso de RNA.	47
Figura 23 – MMQ para informações do sensor Hall.	48
Figura 24 – Gerador dos dados de treinamento para sensor Hall.	48
Figura 25 – Comportamento da RNA para sensor Hall.....	49
Figura 26 – Interface gráfica para inspeção por sensor Hall com uso de RNA.	50
Figura 27 – Sinal de ultrassom Amplitude (V) x Tempo (μ s) do bloco padrão V1. (a) Sinal da espessura de 100 mm e (b) picos das espessuras de 85, 91 e 100 mm.	52
Figura 28 – Sinal de ultrassom Amplitude (V) x Tempo (μ s) do duto de aço médio carbono. (a) Sinal sem furos e (b) pico de um furo circulado em vermelho.	53
Figura 29 – Sinal obtido pelo sensor Hall no duto de aço médio carbono em 20 s.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Propriedades acústicas dos materiais.....	17
Tabela 2 – Principais Características dos Ensaios Não Destrutivos.....	20
Tabela 3 – Transdutores mais utilizados.	23
Tabela 4 – Transdutor “Phased Array”.....	24
Tabela 5 – Técnicas de Inspeção por Ultrassom.	26
Tabela 6 – Exemplos de Funções de Ativação.	33
Tabela 7 – Espessura do duto da Figura 12 nas diferentes regiões de medição.	38
Tabela 8 – Inspeção do bloco padrão V1 pela técnica de ultrassom.	51
Tabela 9 – Resultados obtidos pela RNA usando o ensaio por ultrassom no duto de médio carbono.	54
Tabela 10 – Valores de tensões esperadas para diferentes espessuras.	55
Tabela 11 – Resultados obtidos pela RNA usando o ensaio com sensor Hall no duto de médio carbono.	56

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABENDI - Associação Brasileira de Ensaaios Não Destrutivos	χ_m – Suscetibilidade Magnética
API – American Petroleum Institute	b - Bias
ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis	ω – Pesos Sinápticos
END - Ensaaios Não Destrutivos	f - Função de ativação
GPii – Grupo de Pesquisa em Integridade e Inspeção	a_d -Valor de saída desejado
RNA – Rede Neural Artificial	a - Valor de saída obtido
MMQ – Método dos Mínimos Quadrados	e - Erro
V – Velocidade de Propagação;	p - Dados de entrada
f – Frequência;	ΔS – Variação da distância percorrida
λ – Comprimento de Onda;	Δt – Variação do tempo
D_{ef} – Diâmetro Efetivo do Cristal	y – Tensão
N – Extensão do Campo Próximo	x – Espessura
Z – Impedância Acústica	
ρ – Massa Específica	
R – Fração de Energia Sônica Refletida	
T – Fração de Energia Sônica Transmitida	
H – Intensidade do Campo Magnético	
n – Número de Espiras	
I – Corrente	
l – Comprimento	
B – Indução Magnética ou Densidade do Fluxo Magnético	
μ - Permeabilidade Magnética	
μ_o – Permeabilidade Magnética do Vácuo	
μ_r – Permeabilidade Relativa	
M – Magnetização	

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 OBJETIVO GERAL	14
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE ONDAS SONORAS	15
2.2 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE CAMPO MAGNÉTICO	17
2.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)	19
2.3.1 Ensaio não destrutivo por ultrassom	21
2.3.1.1 Geração das ondas ultrassônicas	22
2.3.1.2 Atenuação sonora	24
2.3.1.3 Campo sônico	24
2.3.1.4 Técnicas de inspeção	25
2.3.2 Caracterização por medidas de tensão usando sensores de efeito Hall	27
2.4 REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA)	29
2.4.1. Neurônios	30
2.4.2. Estrutura da RNA	32
2.5 TUBULAÇÕES TRANSPORTADORAS DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL	35
3 MATERIAIS E MÉTODOS	37
3.1 MATERIAIS	37
3.2 APLICAÇÃO DA ULTRASSOM	38
3.3 CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA	42
3.4 DESENVOLVIMENTO DAS RNAs	44
3.4.1 RNA para inspeção por ultrassom	45
3.4.2 RNA para inspeção usando sensor Hall	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	51
4.1 INSPEÇÃO POR ULTRASSOM	51
4.2 INSPEÇÃO COM SENSOR HALL	54
5 CONCLUSÃO	57
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

A estrutura de abastecimento de petróleo e derivados interliga, através de várias modalidades de transporte, três pontos distintos: fontes de produção, refinarias e os centros de consumo. No fator segurança, os dutos comparados a outros meios de transporte, como navios-tanques e caminhões-tanque, têm apresentado resultados mais satisfatórios, tanto no abastecimento das refinarias como no suprimento dos grandes centros de derivados (MISHINA *et al.*, 2008).

Os mecanismos de danos em equipamentos da indústria química e petroquímica são de forma bastante diversificada, em função das próprias condições operacionais e ambientais de trabalho em que os mesmos estão expostos. Para se ter um eficiente controle dos mesmos, é indispensável o conhecimento do princípio, da forma de propagação do dano e os métodos de prevenção.

Este controle é importante pois, dentre outros fatores, o setor petrolífero trabalha com substâncias poluidoras do meio ambiente e o vazamento das mesmas provoca grandes impactos ambientais. Com isso, o setor industrial vem se preocupando cada vez mais com manutenção preditiva de máquinas e equipamentos, que consiste basicamente em monitorar parâmetros que caracterizam a condição estrutural de máquinas e equipamentos de forma a poder detectar, prever a época provável de ocorrência, e se possível, diagnosticar o tipo de falha para que se possa planejar a operação de manutenção na ocasião e de forma convincente (SILVA, 2011).

Todo o processo de inspeção de equipamentos está diretamente relacionado com a realização de Ensaios Não Destrutivos (END) nas etapas de detecção, dimensionamento e na determinação da taxa de evolução deste dano.

Os ENDs são técnicas experimentais empregadas na avaliação da integridade do produto (detecção de falta de homogeneidades ou descontinuidades) sem alterar as características físicas, químicas ou geométricas dos mesmos, além de não interferir com sua posterior utilização. Muitas das limitações destas técnicas de inspeção resultam da impossibilidade de verificar, em muitos casos, 100% das regiões sujeitas ao dano, bem como as limitações inerentes aos próprios ENDs. Em função disto, é comum utilizar em alguns casos a associação de mais de um ensaio (KAMINSKI, 1997).

Dentre as diversas técnicas de END presentes na indústria, pode-se citar o ensaio de ultrassom e ensaio magnético com sensor Hall para identificação do dano. O ensaio por

ultrassom consiste em emitir ondas ultrassônicas nas superfícies dos materiais, com a finalidade de detectar descontinuidades internas. Já o ensaio magnético com sensor Hall permite a detecção de descontinuidades externas e internas nos materiais pelo monitoramento da intensidade do fluxo magnético em materiais com propriedades magnéticas.

Atualmente, o emprego de Inteligência Artificial, como Redes Neurais Artificiais (RNAs), em ENDs é cada vez mais notório, pois proporciona uma maior facilidade na inspeção, na localização de descontinuidades, na sua caracterização, dentre outros fatores, com o maior grau de precisão possível.

As Redes Neurais Artificiais (RNAs) são semelhantes às estruturas neurais biológicas, porém com tecnologia computacional, onde apresentam a capacidade de armazenar conhecimentos experimentais e executa tarefas e funções devido a capacidade de aprendizado.

1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver um método capaz de monitorar mecanismos de dano em dutos por meio da aplicação dos ensaios não destrutivos por ultrassom e campo magnético, usando sensor Hall, com o auxílio de redes neurais artificiais.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Utilizar ENDs de ultrassom e ensaio magnético com o uso de sensor Hall;
- b) Analisar os dados e resultados obtidos pelas técnicas de ultrassom e sensor Hall;
- c) Analisar as vantagens, desvantagens e limitações da técnica de ultrassom e ensaio magnético com sensor Hall, comparando-as;
- d) Verificar a integridade estrutural de dutos, analisando sua perda de espessura devido à corrosão.
- e) Aplicar RNAs no auxílio dos END;
- f) Desenvolver RNAs capazes de interpretar as informações das medições e fornecer o valor de espessura esperada.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Nessa seção serão abordados tópicos relacionados a fundamentos das ondas sonoras, do magnetismo, das técnicas de ensaios não destrutivos, dando prioridade para o ensaio por ultrassom e aplicação de sensores de efeito Hall. Além de tratar da importância da aplicação de uma manutenção preditiva em dutos transportadores de petróleo e gás natural, sujeitas à corrosão.

2.1 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE ONDAS SONORAS

Pelo estudo da obra de Halliday (a), 2016, entende-se que o som é uma onda mecânica tridimensional. Onda porque ele é capaz de transportar apenas energia, sem carregar a matéria. Mecânica pois ele precisa de um meio para se propagar e origina-se por meio de vibrações no meio em que vão se propagar. Tridimensional uma vez que pode ser percebida em todas as direções.

Para um melhor entendimento das ondas acústicas é necessário apresentar alguns conceitos, como por exemplo: frequência, velocidade de propagação, comprimento de onda, forma de propagação e impedância acústica.

A frequência, f , pode ser entendida como a medida do quanto as vibrações repetem-se periodicamente durante um certo tempo, expressa em ciclos por segundo (Hz). O intervalo de frequência compreendido entre 20 Hz e 20 kHz representa a faixa audível pelo ser humano. Valores abaixo e acima desse intervalo são denominados de infrassom e ultrassom, respectivamente, como indica a Figura 1. A frequência de ondas sônicas depende apenas da fonte emissora (ANDREUCCI, 2008).

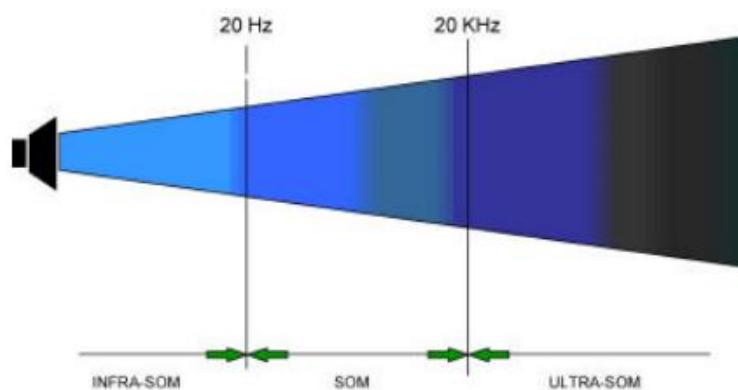


Figura 1 – Campo de Audibilidade das Vibrações Mecânicas.

Fonte: Andreucci (2008).

A velocidade de propagação, V , é uma característica do meio, dependendo apenas do material e do modo de vibração, definida como a distância percorrida pela onda sônica por unidade de tempo.

O comprimento de onda, λ , é a distância entre valores sucessivos num padrão de onda, ou seja, representa uma oscilação completa no espaço da posição. Ele pode ser determinado de acordo com a Equação (1).

$$V = \lambda \cdot f \quad (1)$$

De acordo com a forma de propagação, as ondas sonoras são classificadas em ondas longitudinais, transversais, superficiais e de Lamb. Nas ondas longitudinais, as partículas oscilam na direção de propagação da onda, enquanto que nas transversais as partículas vibram perpendicularmente à direção de propagação (ANDREUCCI, 2008). As ondas superficiais são caracterizadas pelo movimento das ondas ao longo da interface entre um corpo sólido e um gás (ar) e as ondas de Lamb consiste em uma vibração complexa das partículas ao longo da espessura de chapas finas (SANTIN, 2003).

Por fim, a impedância acústica representa a quantidade de energia refletida ou transmitida na interface entre dois materiais. Se as impedâncias acústicas dos dois materiais forem iguais, não haverá reflexão, e toda energia será transmitida. Se as impedâncias forem muito diferentes, haverá apenas reflexão (SANTIN, 2003).

A impedância acústica Z é expressa pelo produto da massa específica, ρ , e pela velocidade de propagação do material, conforme Equação (2).

$$Z = \rho \cdot V \quad (2)$$

Em geral pode-se calcular as frações de energia sônica que é refletida e transmitida pela interface entre dois materiais deferentes usando as Equações (3) e (4), respectivamente.

$$R = \frac{(Z_2 - Z_1)^2}{(Z_2 + Z_1)^2} \quad (3)$$

$$T = 1 - R \quad (4)$$

Sendo Z_1 e Z_2 as impedâncias dos dois meios que formam a interface. A Tabela 1 informa as propriedades acústicas de alguns materiais.

Tabela 1 – Propriedades acústicas dos materiais.

MATERIAL	Massa Específica (kg/m³)	Velocidade Transversal (m/s)	Velocidade Longitudinal (m/s)	Impedância Acústica (10⁶ kg/m²s)
Aço carbono	7850	3250	5920	46,472
Aço baixa liga	7850	3250	5940	46,629
Água (gelo)	900	1990	3980	3,582
Água (20°C)	1000	-	1480	1,480
Alumínio	2700	3130	6320	17,064
Alumínio (óxido)	3600	5500	9000	32,400
Bronze	8100	2120	4430	35,883
Cobre	8900	2250	4700	41,830
Ferro fundido	6900	2200	5300	36,570
Ferro fundido cinzento	7200	2650	4600	33,120
Glicerina	1300	-	1920	2,496
Óleo automotivo	870	-	1740	1,514
Porcelana	2400	3500	5600	13,440
PVC	1400	1060	2395	3,353
Vidro	3600	2560	4260	15,336

Fonte: Santin (2003), adaptada pelo autor.

2.2 FUNDAMENTOS FÍSICOS DE CAMPO MAGNÉTICO

O magnetismo é um fenômeno pelo qual os materiais magnéticos exercem uma influência ou uma força de atração ou de repulsão sobre outros materiais.

As aplicações dos campos magnéticos e das forças magnéticas são incontáveis e mudam a cada ano. Dentre vários exemplos, pode-se citar um carro moderno que vem equipado com dezenas de ímãs, que são usados no sistema de ignição, no motor de arranque e também para acionar componentes, como vidros elétricos, limpadores de para-brisas e tetos solares (HALLIDAY (b), 2016). Além de geradores, transformadores de energia elétrica, motores elétricos, rádios, televisões, telefones, computadores e componentes de sistemas de reprodução de som e vídeo.

Para um melhor entendimento das propriedades magnéticas dos materiais é necessário apresentar alguns conceitos, como por exemplo: campo magnético, indução magnética, permeabilidade, magnetização e suscetibilidade magnética. Os conceitos apresentados a seguir estão de acordo com Callister (2008).

O campo magnético aplicado externamente é designado por H . Se o campo magnético for gerado por meio de uma bobina cilíndrica (ou solenoide), formada por n espiras de espaçamento compactado, com comprimento l e que conduz corrente com magnitude I , como indica a Equação (5)

$$H = \frac{n \cdot I}{L} \quad (5)$$

A indução magnética, indicada por B , representa a magnitude do campo interno no interior de uma substância que está sujeita a um campo H . A unidade para B é o tesla ou weber por metro quadrado (Wb/m^2). Tanto B quanto H são vetores do campo. A intensidade do campo magnético e a densidade do fluxo estão relacionadas de acordo com a Equação (6).

$$B = \mu \cdot H \quad (6)$$

O parâmetro μ é chamado de permeabilidade, uma propriedade do meio específico através do qual o campo H passa e onde B é medido. A permeabilidade tem dimensões de weber por ampère metro (Wb/A.m) ou henry por metro (H/m).

No vácuo a permeabilidade magnética é uma constante, $\mu_0 = 4\pi 10^{-7} \text{ H/m}$. Vários parâmetros podem ser empregados para escrever as propriedades magnéticas dos sólidos. Um desses parâmetros é a razão entre permeabilidade em um material e a permeabilidade no vácuo, conhecida como permeabilidade relativa (adimensional), μ_r , definida por meio da Equação (7).

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (7)$$

Ele representa uma medida do grau segundo o qual o material pode ser magnetizado, ou da facilidade pela qual um campo B pode ser induzido na presença de um campo externo H.

Fisicamente a indução magnética B, em um material é proveniente da ação sinérgica do campo aplicado e da magnetização M, onde pode ser expresso matematicamente por meio da Equação (8).

$$B = \mu_0 H + \mu_0 M \quad (8)$$

A magnitude de M, magnetização do sólido, é proporcional ao campo aplicado de acordo com a Equação (9).

$$M = \chi_m H \quad (9)$$

Onde χ_m é denominado de susceptibilidade magnética, adimensional e mensura a capacidade que um material tem em magnetizar-se sob a ação de um campo magnético. A suscetibilidade magnética e a permeabilidade relativa estão relacionadas pela Equação (10).

$$\chi_m = \mu_r - 1 \quad (10)$$

2.3 ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS (END)

A Associação Brasileira de Ensaios Não Destrutivos e Inspeção (ABENDI, 2018) trata de Ensaios Não Destrutivos (END) como técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos para detectar discontinuidades, visando manter a indústria e a própria sociedade, livre de acidentes.

Os ENDs estão entre as principais ferramentas do controle da qualidade de materiais e produtos, pois incluem métodos capazes de proporcionar informações a respeito do teor de defeitos de um determinado produto. Eles são amplamente utilizados nos setores de petróleo/petroquímico, químico, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico, entre outros.

As principais técnicas de END são: correntes parasitas, emissão acústica, radiografia, radioscopia, gamagrafia, ensaio visual, estanqueidade, líquido penetrante, partículas magnéticas, ultrassom e termografia. A Tabela 2 apresenta algumas características dos ENDs mais usados.

Tabela 2 – Principais Características dos Ensaaios Não Destrutivos.

	Material Inspeccionado	Defeitos Localizados	Custo de Equipamentos	Custo Operacional
Líquido Penetrante	Metálico e não metálico	Superficiais	Sem custo	Alto
Partículas Magnéticas	Somente ferromagnéticos	Superficiais e internos	Médio a alto	Baixo
Correntes Parasitas	Metais ferrosos e não ferrosos	Superficiais	Médio a alto	Baixo
Raio X	Praticamente qualquer material	Internos	Alto	Alto
Ultrassom	Qualquer material que conduza som	Internos	Médio a alto	Médio

Fonte: REVISTA DO PARAFUSO (2009), adaptada pelo autor.

A análise da Tabela 2 permite conhecer as técnicas de END mais empregadas e definir qual o melhor para determinada aplicação, levando em consideração o tipo de material que se deseja analisar, exigência do ensaio, qualificação exigida do inspetor e se o defeito a ser analisado é superficial ou interno.

As técnicas utilizadas no presente trabalho foram a de ultrassom e a caracterização da permeabilidade magnética com utilização de sensor Hall para detecção de perdas de espessura em dutos transportadores de petróleo ou gás natural. Essas técnicas serão estudados com maior detalhe nas próximas seções.

2.3.1 Ensaio não destrutivo por ultrassom

Desde a década de 1950, as técnicas de ultrassom vem sendo aplicadas, com sucesso, em diversas áreas para testes e exames de várias estruturas. Suas principais aplicações são: medições de distância, espessuras, verificação de descontinuidades e corrosão de materiais, determinação de falhas na geometria de um objeto, entre outras (DUARTE *et al*, 1999).

A onda ultrassônica ao incidir num anteparo qualquer ou ao incidir numa descontinuidade ou falha interna do meio elástico refletirá. As ondas refletidas provenientes do interior da peça examinada serão detectadas pelo transdutor, possibilitando a localização das descontinuidades (ANDREUCCI, 2008). Esse efeito pode ser ilustrado por meio da Figura 2.

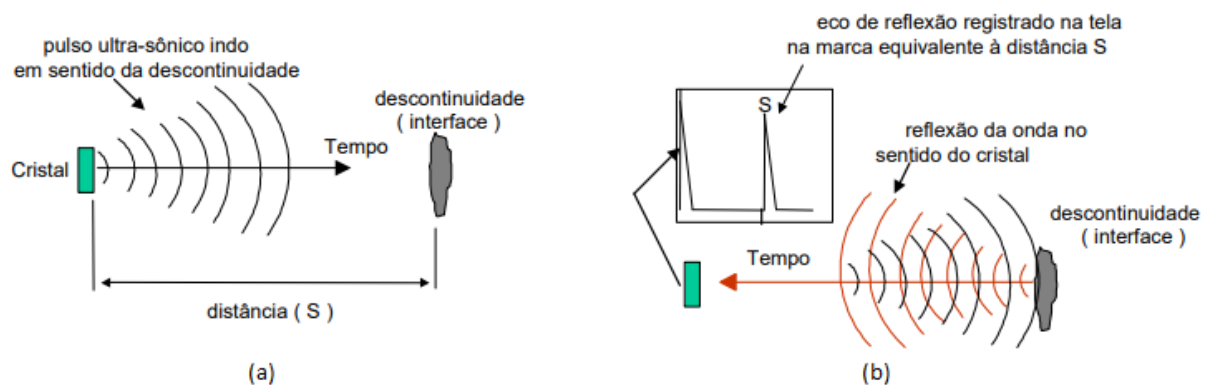


Figura 2 – Inspeção de materiais por ultrassom. (a) Transmissão da onda ultrassônica e (b) sua recepção.

Fonte: Andreucci (2008), adaptada pelo autor.

A ultrassom como END possui várias aplicações. Em sistemas mecânicos, pode ser utilizada para inspecionar a integridade de válvulas, rolamentos, tubulações, bombas, compressores, engrenagens e muitos outros. Ou seja, é bastante utilizada em manutenção preditiva.

Em sua pesquisa, Conde *et al* (2014), aplicou a técnica não destrutiva de ultrassom para avaliar o estado de conservação de estruturas de madeira que servem como pontos de sustentação de um edifício com grande valor histórico, “El Corral del Conde” – Espanha. Nele foi apresentado uma proposta de implantação de uma intervenção sustentável com o END de ultrassom, visando substituir apenas a parte danificada da estrutura e não ela toda,

diminuindo assim o consumo de energia e emissão de CO₂ associados à fabricação desses elementos.

No trabalho de Freeseaman *et al* (2016), a ultrassom como END foi utilizada para verificar a integridade estrutural de uma coluna de concreto armado submetida a simulações de terremotos. Seus resultados mostram a capacidade da técnica de ultrassom em detectar danos e defeitos internos, representando um método importante de monitoramento de infraestruturas.

Em sua pesquisa, Simas Filho *et al* (2013), apresenta uma aplicação da inspeção por ultrassom na indústria aeroespacial, por meio da detecção de falhas em uma fibra desenvolvida por essa indústria.

2.3.1.1 Geração das ondas ultrassônicas

A ultrassom pode ser gerada por vários métodos, como por exemplo: efeito piezelétrico, choques ou atritos mecânicos, excitação térmica e outros. Porém, a maneira mais usual de gerá-la é através da utilização de cristais piezelétricos.

O efeito piezoelétrico é um fenômeno reversível apresentado por alguns materiais, caracterizado como a capacidade destes se expandirem ou comprimirem em resposta a aplicação de uma diferença de potencial externa ou, reciprocamente, produzirem uma polarização dielétrica em resposta a uma deformação externa ao material (ALMEIDA, 2011).

O quartzo, o sulfato de lítio, o titânio de bário, o metaniobato de chumbo e o zirconato-titanato de chumbo são exemplos de materiais piezelétricos. A Figura 3 mostra o funcionamento de um cristal piezelétrico.

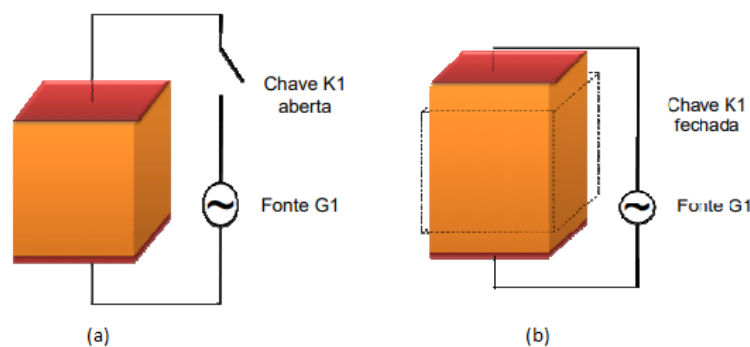
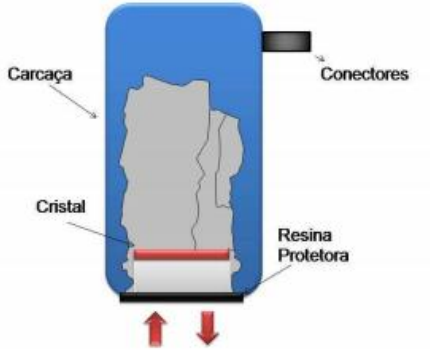
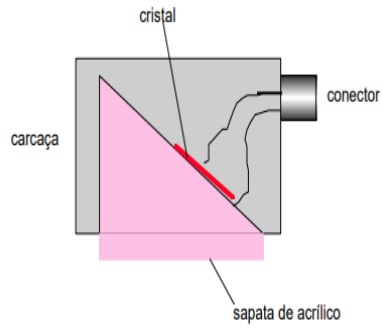
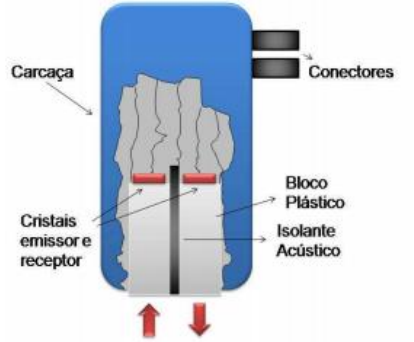


Figura 3 – Cristal piezelétrico (a) sem a ação do campo elétrico e (b) com a ação do campo elétrico.

Fonte: Rezende *et al* (2011), adaptada pelo autor.

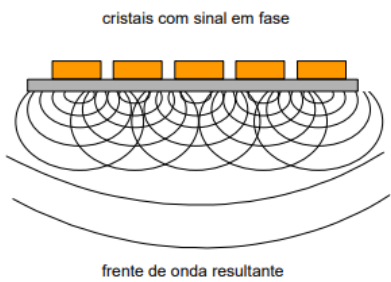
O elemento responsável pela transmissão e recepção das ondas sônicas são chamados de transdutores ou cabeçotes, que são compostos pelas seguintes partes: cristal piezelétrico, bloco amortecedor, face protetora ou bloco de retardamento, conectores elétricos e carcaça (SANTIN, 2003). Existem três tipos usuais de transdutores: Reto ou Normal, o angular e o duplo-cristal. Outro cabeçote bastante utilizado é o “Phased Array”. Eles são ilustrados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3 – Transdutores mais utilizados.

Transdutor Normal ou Reto	
	<ul style="list-style-type: none"> • Possui um cristal piezelétrico; • Geram ondas longitudinais normais a superfície de acoplamento; • Utilizado na inspeção de peças com superfícies paralelas ou quando se deseja detectar discontinuidades na direção perpendicular à superfície da peça.
Transdutor Angular	
	<ul style="list-style-type: none"> • Possui um cristal piezelétrico; • Cristal piezelétrico forma um determinado ângulo com a superfície do material; • Utilizado na inspeção de soldas quando a discontinuidade está orientada perpendicularmente à superfície da peça.
Transdutor de Duplo-Cristal	
	<ul style="list-style-type: none"> • Possui dois cristais piezelétricos, um funcionando apenas como receptor e o outro apenas como emissor; • Geram ondas longitudinais normais a superfície de acoplamento; • Utilizado na detecção de discontinuidades próximas da superfície e em medição de espessura

Fonte: Andreucci (2008), adaptada pelo autor.

Tabela 4 – Transdutor “Phased Array”.

Transdutor “Phased Array”	
 <p>cristais com sinal em fase</p> <p>frente de onda resultante</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Operam com dezenas de pequenos cristais piezelétricos; • Podem gerar ondas perpendiculares ao plano da superfície ou uma frente de onda angular à superfície; • Permite maior velocidade de inspeção, principalmente em soldas.

Fonte: Andreucci (2008), adaptada pelo autor.

As Tabelas 3 e 4 apresentam características dos mais variados tipos de transdutores, permitindo a escolha do cabeçote de acordo com o tipo de aplicação.

2.3.1.2 Atenuação sonora

A intensidade do feixe sônico recebido por um transdutor é consideravelmente menor que a intensidade inicial transmitida. Os principais fatores responsáveis por esta perda de intensidade podem ser classificados como: perdas por transmissão, efeitos de interferência e dispersão de feixe (SANTIN, 2003).

As perdas por transmissão incluem absorção, que é a conversão da energia mecânica em térmica; espalhamento, devido os materiais não serem totalmente homogêneos e efeito da impedância acústica nas interfaces.

Os efeitos de interferência incluem a difração, fenômeno que permite que uma onda atravesse fendas ou contorne obstáculos, e outros efeitos que causam deslocamento de fase ou deslocamento da frequência da onda (SANTIN, 2003).

2.3.1.3 Campo sônico

O campo sônico de um transdutor pode ser verificado na Figura 4. Ele apresenta uma região chamada de campo próximo, e uma região chamada de campo distante, que apresenta maior facilidade na localização das discontinuidades.

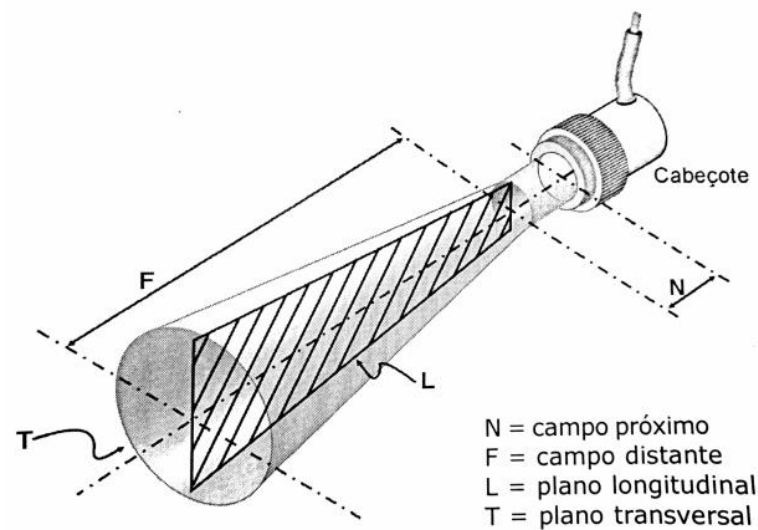


Figura 4 – Aspecto geométrico do feixe sônico.

Fonte: Santin (2003).

A extensão N do campo próximo pode ser calculada pela Equação (11), que depende do diâmetro do cristal e do comprimento de onda. A determinação desse valor é importante pois nessa região pequenas descontinuidades, menores que o diâmetro do transdutor, são difíceis de serem detectadas (ANDREUCCI, 2008).

$$N = D_{ef}^2 / 4 \cdot \lambda \quad (11)$$

Sendo D_{ef} o diâmetro efetivo do cristal, ou área acusticamente efetiva do cristal depende da forma geométrica do cabeçote. Para cristais circulares, $D_{ef} = 0,97 \times$ diâmetro do cristal. E para cristais retangulares, $D_{ef} = 0,97 \times$ metade do comprimento do lado maior do cristal (ANDREUCCI, 2008).

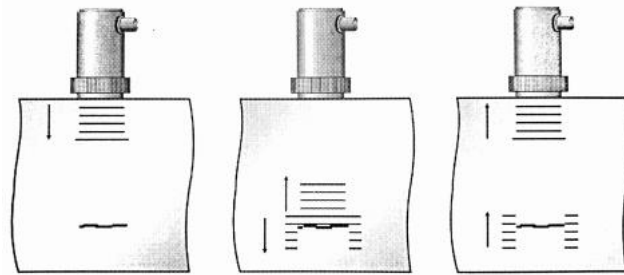
2.3.1.4 Técnicas de inspeção

A inspeção de materiais por ultrassom pode ser efetuada através da técnica de pulso-eco, de transparência e de imersão. Suas características são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 – Técnicas de Inspeção por Ultrassom.

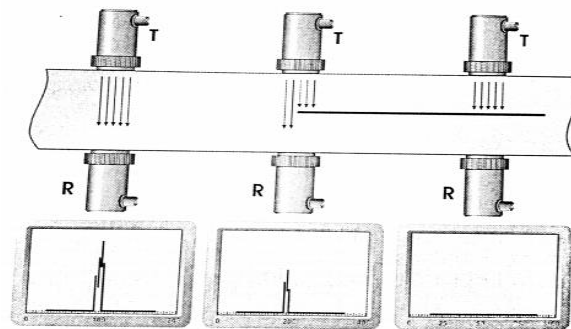
Técnica de Pulso-Eco

- Utiliza apenas um transdutor é responsável por emitir e receber as ondas;
- Detecta a profundidade da descontinuidade, suas dimensões e localização da peça;
 - Método mais utilizado devido sua simplicidade.



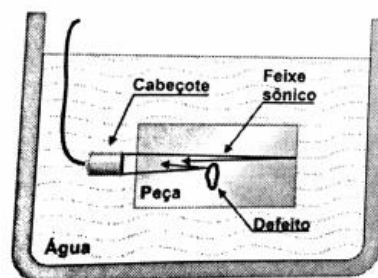
Técnica de Transparência

- Usa dois transdutores, um transmite e o outro recebe as ondas;
- Consiste apenas em um ensaio do tipo passa - não passa;
- Necessita que os transdutores estejam perfeitamente alinhados nas superfícies opostas da peça.



Técnica de Imersão

- Usa um transdutor de imersão à prova d'água. Ele não entra em contato direto com a peça;
- Propicia um acoplamento sempre homogêneo, pois a peça é colocada dentro de um tanque com água.



Ao acoplar o transdutor sobre a peça a ser inspecionada, imediatamente estabelece uma camada de ar entre a sapata do transdutor e a superfície da peça. Esta camada de ar impede que as vibrações mecânicas produzidas se propaguem para a peça em razão das impedâncias acústicas serem muito diferentes (ANDREUCCI, 2008).

Por esta razão, deve-se usar um líquido que estabeleça uma redução desta diferença, e permita a passagem das vibrações para a peça. Tais líquidos são denominados de líquido acoplante.

Os acoplantes normalmente usados na inspeção por contato incluem: água, óleo, glicerina, graxas derivadas de petróleo, graxas de silicone, colas de papel de parede, como o carboxi-metil-celulose e outros produtos líquidos ou pastosos (SANTIN, 2003).

2.3.2 Caracterização por medidas de tensão usando sensores de efeito Hall

Um ensaio não destrutivo baseado na caracterização da permeabilidade magnética usa o efeito Hall. Dentre suas várias aplicações, ele pode ser usado para a determinação de descontinuidades (trincas) no material pela perturbação do campo magnético nessas regiões.

O efeito Hall, descoberto em 1879 por Edwin Herbert Hall, pode ser explicado com o auxílio da Figura 5. A Figura 5 (a) ilustra uma placa fina de material condutor, como o cobre, que está passando uma corrente, I , alimentado por uma bateria. Um voltímetro é utilizado para medir a variação de voltagem, com valor inicial zero (RAMSDEN, 2006)

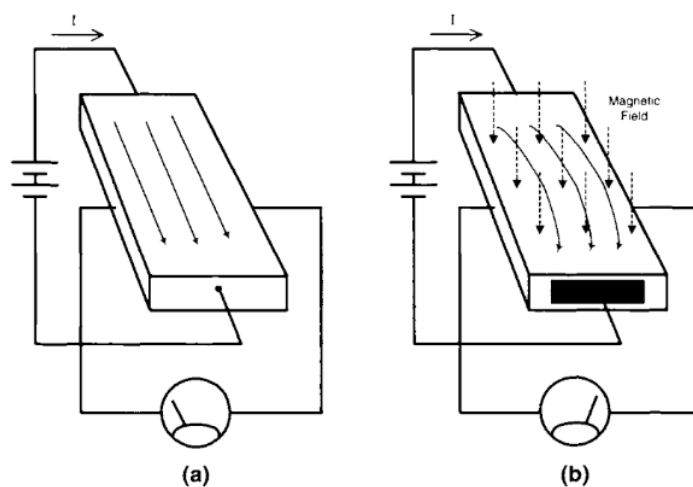


Figura 5 – Princípio do efeito Hall, (a) sem campo magnético e (b) com campo magnético.

Fonte: Ramsden (2006).

Quando um campo magnético é aplicado na placa, Figura 5 (b), a trajetória da corrente muda em determinada angulação, surgindo uma diferença de potencial ao longo da placa (RAMSDEN, 2006).

Com o campo magnético \vec{B} apontando para dentro da placa e a corrente de cima para baixo, nota-se que uma força eletromagnética F atuará sobre os elétrons, empurrando-os para a direita, pela regra da mão esquerda, Figura 6 (a). Com isso, acumulará elétrons na borda da direita e faltarão na borda esquerda, gerando um campo elétrico E . Posteriormente, constituirá um equilíbrio entre o campo magnético B e o campo elétrico E , onde E estará associado à diferença de potencial Hall V , Figura 6 (b).

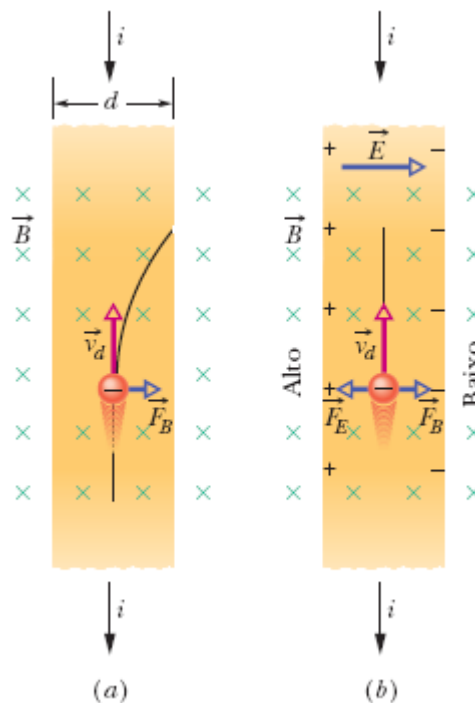


Figura 6 – Fita de cobre percorrida por uma corrente I é submetida a um campo magnético B . (a) Situação logo depois que o campo magnético é aplicado, mostrando a trajetória curva de um elétron. (b) Situação após o equilíbrio ser atingido, o que acontece rapidamente.

Fonte: Halliday (b) 2016, adaptada pelo autor.

Se reverter a direção (polaridade) do campo magnético, a polaridade da voltagem induzida também reverterá. Esse fenômeno é chamado de Efeito Hall (RAMSDEN, 2006).

O efeito Hall pode ser encontrado na indústria em aplicações de sensoriamento, como por exemplo: tacômetros, switches, medidores de posição, inclinação, nível, corrente, tensão e etc. Também podem ser encontrados na indústria de aviação, utilizados em técnicas não destrutivas, com o propósito de detectar fissuras em materiais (KOSMAS, 2005).

Em um trabalho realizado, Cavalcante *et al.* (2008) apresentou a utilização de sensores de efeito Hall, para a caracterização microestrutural de aços, submetidos a diversos tratamentos térmicos. Foram utilizadas amostras de aço carbono 1045, submetidas a diferentes tempos de tratamento térmico, expostos a um campo de 300 Gauss para determinar os valores de tensão hall. Segundo Cavalcante *et al.* (2008) os resultados obtidos mostram que o sensor Hall é sensível a mudança microestrutural e que o mesmo se apresenta como um método não destrutivo promissor.

Em seu estudo, Kosmas *et al.* (2005), aplicaram sensor Hall como uma ensaio não destrutivo para detecção de trincas no setor aeronáutico, através da perturbação do fluxo magnético perto da descontinuidade. Eles enfatizaram a importância da detecção do tamanho e posição de ranhuras do ponto de vista da segurança e economia da operação estrutural.

Em sua pesquisa, Jun *et al.* (2011), usaram duas técnicas não destrutivas para avaliação do aço inoxidável austenítico, dentre elas a aplicação do sensor Hall, visando identificar a magnetização parcial do aço gerada por tratamentos térmicos e por processos de fabricação como laminação e soldagem. O grande problema dos métodos convencionais é não permitir a diferenciação entre essa magnetização parcial e a presença de possíveis ranhuras no material.

2.4 REDE NEURAL ARTIFICIAL (RNA)

De acordo com Haykin (2008), redes neurais artificiais (RNA) são um processador feito de unidades simples de processamento que apresenta uma propensão natural para armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso. Assemelha-se ao cérebro humano em dois aspectos: O conhecimento é adquirido pela rede a partir do ambiente através de um processo de aprendizagem e as forças de internas de conexão, conhecidas como pesos sinápticos, são usadas para armazenar o conhecimento adquirido.

Por volta de 1943, McCulloch & Pitts publicaram seu primeiro trabalho relacionado à neurocomputação. Neste trabalho, os autores propuseram o primeiro modelo matemático inspirado em um neurônio biológico (AMORIM, 2015). Com o passar do tempo e avanço tecnológico, novos estudos para aprimoramento e desenvolvimento da inteligência artificial surgiram.

Desde então, as RNAs estão sendo aplicadas em diversos problemas relacionados às engenharias e ciências. As potenciais áreas de sua aplicação são: aproximador universal de funções, controle de processos, reconhecimento e classificação de padrões, agrupamento de dados, sistemas de previsão, otimização de sistemas e memórias associativas (SILVA, 2010).

Na sua pesquisa, Jiang *et al.*(2016), utilizou rede neural artificial para verificar corrosões em canos de concreto aplicados no transporte de esgoto. A RNA foi desenvolvida para prever o tempo de início da corrosão e a sua taxa de propagação. Esse estudo visa aprimorar o planejamento e manutenção dos canos de esgoto.

No seu estudo, Gao *et al* (2018), desenvolveu uma RNA capaz de estimar a concentração de ozônio na atmosfera, no período de 9:00 h da manhã até 6:00 h da tarde, da área urbana de Jinan, metrópole do norte da China. Para isso, utilizou parâmetros como temperatura máxima, umidade relativa, pressão barométrica máxima, duração da luz do Sol, velocidade do vento, além da distribuição média de ozônio em dias de trabalho, fins de semana e feriados. Esse estudo preocupa-se com a saúde pública da região, determinando teores de poluição do ar pela presença do ozônio.

Em seu trabalho, Sambath *et al* (2011), desenvolveu uma RNA objetivando melhorar a sensibilidade na detecção e classificação das falhas em chapas de aço inoxidável pelo teste de ultrassom, usando a técnica de pulso-eco. Quatro tipos de defeitos são analisados: porosidade, falta de fusão, inclusão de tungstênio e regiões não defeituosas.

Uma análise da falha de tubulações transportadoras de petróleo e gás por corrosão usando uma RNA foi feita por Zheng Xu *et al* (2017). Essa análise visa diminuir as falhas dessas tubulações, evitando poluição do meio ambiente por vazamento de petróleo ou gás. Para tanto, foi usado o método de elementos finitos para simular efeitos que diminuem sua espessura com o intuito de alimentar a RNA, que obtém a pressão máxima de ruptura suportada pela tubulação sob efeito de corrosão.

2.4.1. Neurônios

O estudo de RNA é baseado no comportamento das redes neurais biológicas, uma vez que o cérebro humano tem a capacidade de processar as informações, analisá-las, armazená-las e utilizá-las com o auxílio das células chamadas de neurônios.

O neurônio, Figura 7, tem um corpo celular chamado de soma e diversas ramificações. As ramificações chamadas de dendritos conduzem sinais das extremidades para o corpo celular. Existe outra ramificação, geralmente única, chamada de axônio, que transmite um sinal do corpo celular para as extremidades. As extremidades do axônio são conectadas com dendritos de outros neurônios pelas sinapses, tendo como papel fundamental a memorização das informações (BARRETO, 2002)

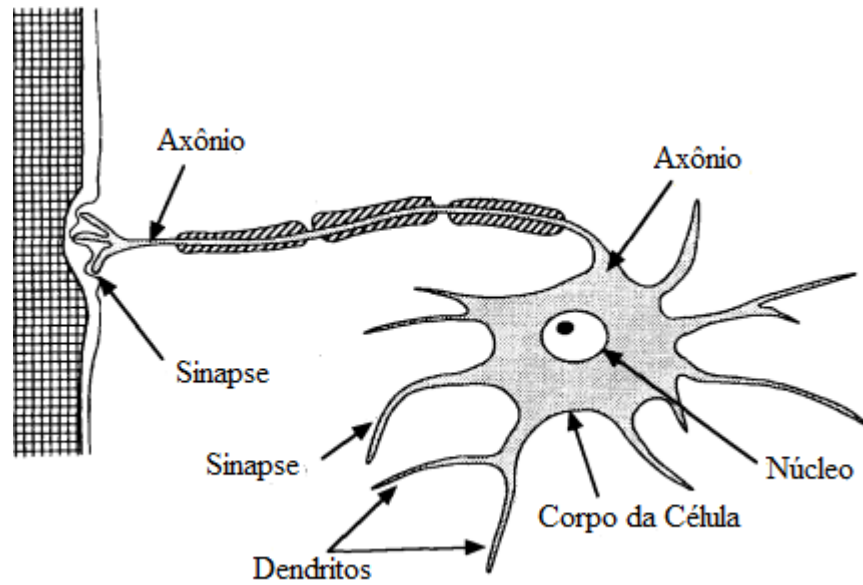


Figura 7 – Neurônio biológico.

Fonte: Freeman e Shapuka (1991), adaptada pelo autor.

A construção de RNAs tem inspiração nos neurônios biológicos e nos sistemas nervosos. Entretanto, atualmente elas estão muito distantes das redes neurais naturais e frequentemente as semelhanças são mínimas (BARRETO, 2002). O modelo artificial de neurônio é mostrado na Figura 8.

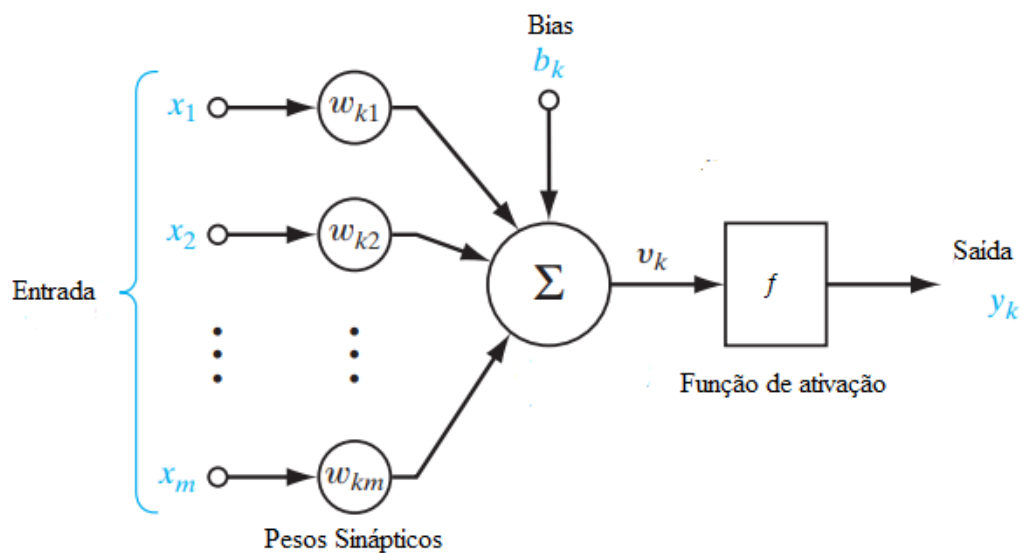


Figura 8 – Modelo de um neurônio artificial.

Fonte: Haykin (2008), adaptada pelo autor.

Toda RNA possui um neurônio artificial como unidade de processamento. Ele apresenta várias entradas, que correspondem às conexões sinápticas com outras unidades similares a ele, e uma saída, cujo valor depende diretamente da somatória ponderada de todas as saídas dos outros neurônios a esse conectado. (MATSUNAGA, 2012).

Esse modelo inclui um sinal adicional bias (b) que favorece ou limita a possibilidade de ativação do neurônio. O processo sináptico é representado pelos pesos (ω) que amplificam cada um dos sinais recebidos. A função de ativação (f) modela a forma como o neurônio responde ao nível de excitação, limitando e definindo a saída da RNA. (MATSUNAGA, 2012).

2.4.2. Estrutura da RNA

Uma RNA é construída a partir de quatro elementos que compõe sua estrutura. São eles: as camadas, os neurônios, a função de transferência e o algoritmo de aprendizado.

As camadas, Figura 9, podem ser de entrada, onde os padrões são apresentados à rede, intermediárias ou ocultas, onde é realizado o processamento das informações com o uso dos pesos sinápticos e de saída, onde o resultado final é apresentado. Os neurônios artificiais são ativados pela função de ativação, cujo objetivo é limitar a saída do neurônio dentro de um intervalo de valores. As principais são: função degrau, degrau bipolar, função logística, função tangente hiperbólica, função gaussiana e função linear. O comportamento delas é expresso na Tabela 6.

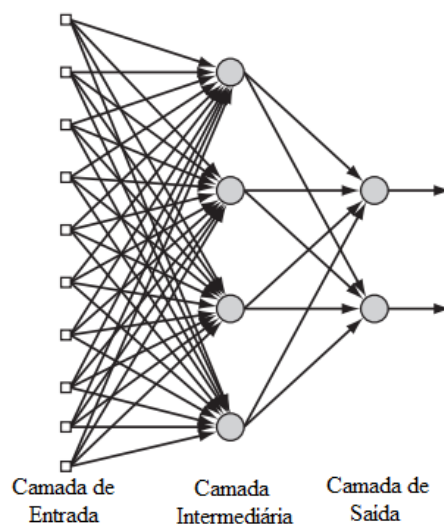
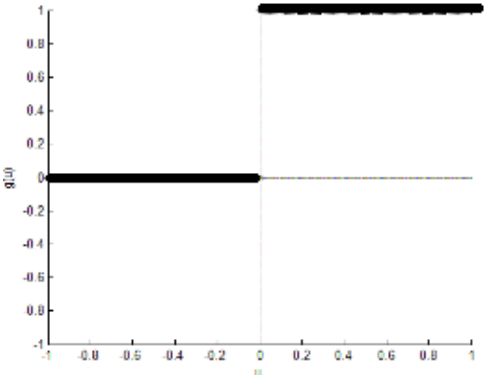
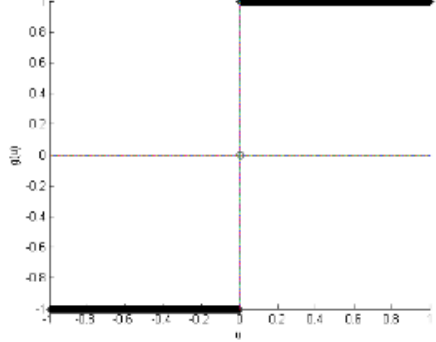
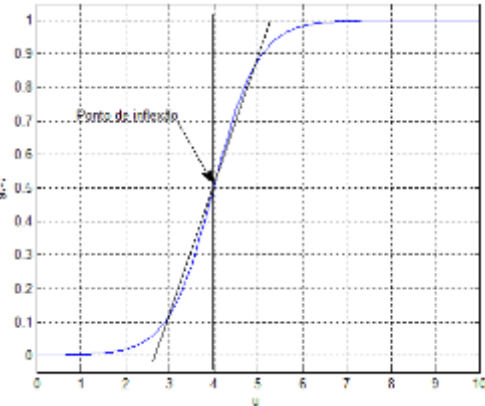
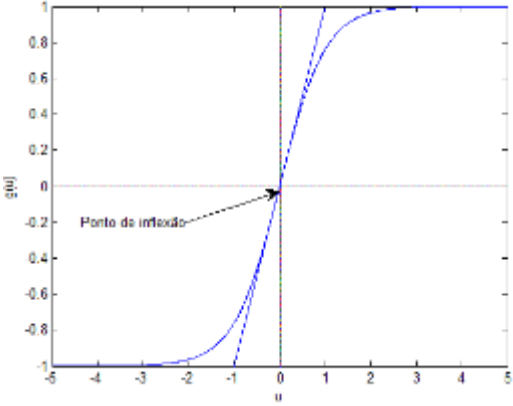
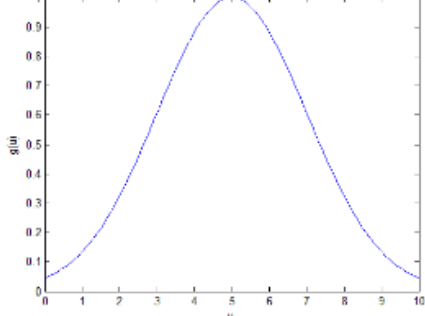
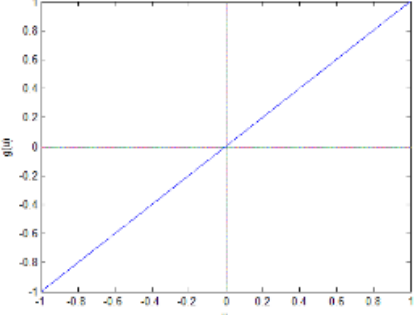


Figura 9 – Camadas de uma RNA.

Fonte: Haykin (2008), adaptada pelo autor.

Tabela 6 – Exemplos de Funções de Ativação.

Função Degrau	Função Degrau Bipolar
 $g(u) = \begin{cases} 1, & \text{se } u \geq 0 \\ 0, & \text{se } u < 0 \end{cases}$	 $g(u) = \begin{cases} 1, & \text{se } u > 0 \\ 0, & \text{se } u = 0 \\ -1, & \text{se } u < 0 \end{cases}$
Função Logística	Função Tangente Hiperbólica
 $g(u) = \frac{1}{1 + e^{-\lambda u}}$	 $g(u) = \frac{1 - e^{-\lambda u}}{1 + e^{-\lambda u}}$
Função Gaussiana	Função Linear
 $g(u) = e^{\frac{-(u-c)^2}{2\sigma^2}}$	 $g(u) = u$

Fonte: Amorim (2015), adaptada pelo autor.

O aprendizado das RNAs pode ser feito na forma supervisionada ou não supervisionada.

No aprendizado supervisionado, o instrutor confere o quanto a rede está próxima de uma solução aceitável, adaptando na concepção do treinamento os pesos entre os neurônios, de modo a prover uma menor diferença entre as saídas desejadas (SILVA, 2010).

Um exemplo do aprendizado supervisionado é o por *backpropagation* ou retropropagação, como ilustra a Figura 10.

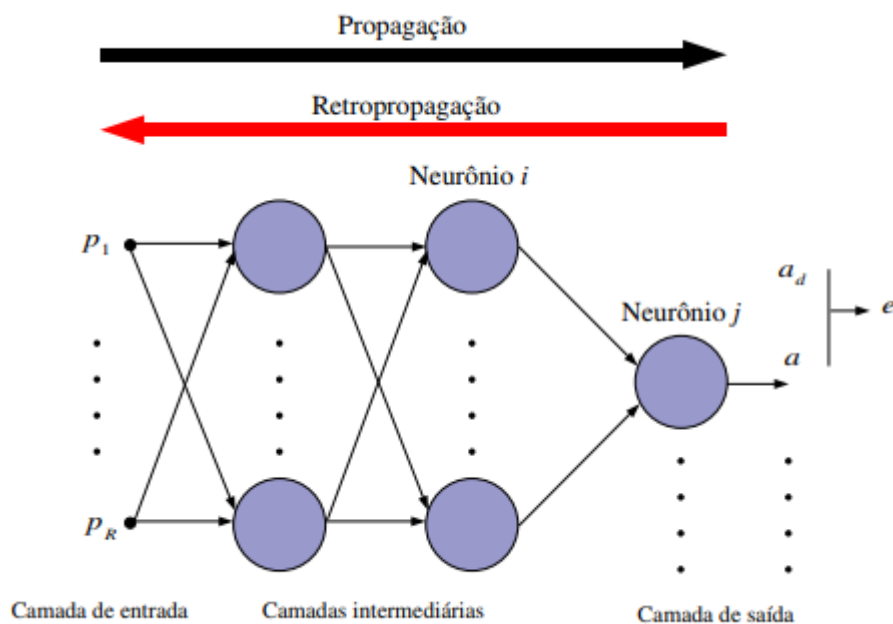


Figura 10 – Ilustração do algoritmo *Backpropagation*, onde a_d indica a saída desejada, a indica a saída obtida, e representa o erro e p representa os dados de entrada.

Fonte: Matsunaga (2012).

Ele consiste em aplicar um padrão de entrada como estímulo à primeira camada, que é propagado através das camadas intermediárias até que uma saída seja gerada. Esta saída é então comparada com a saída desejada, e um sinal de erro é calculado para cada unidade de saída. Esses sinais de erro são então transmitidos para trás da camada de saída, em direção às camadas intermediárias, processo conhecido como backpropagação (FREEMAN e SKAPURA, 1991).

Com base no sinal de erro recebido, em cada elemento da camada oculta, os pesos sinápticos são atualizados objetivando fazer a rede convergir para o valor de saída desejado (FREEMAN e SKAPURA, 1991).

No aprendizado não supervisionado, inexistem saídas desejadas. Não há necessidade de tutor, ou seja, é uma rede extremamente autônoma. A rede se auto-organiza identificando subconjuntos e extraindo particularidades da amostra de entrada (SILVA, 2010).

2.5 TUBULAÇÕES TRANSPORTADORAS DE PETRÓLEO E GÁS NATURAL

Segundo levantamento feito em 2017 pela Agência Nacional de Petróleo, Gás natural e Biocombustíveis (ANP), a produção de petróleo no Brasil em 2016 foi de 2,605 mil barris por dia e consumo de 3,239 mil barris por dia. Neste mesmo ano, a produção de gás natural do país chegou na faixa de 24,9 bilhões de m³, com consumo de 39,5 m³. Essas informações comprovam a grande dependência do país para com esses combustíveis, principalmente como fontes energéticas.

Eles são transportados principalmente via tubulações que interligam a produção, as refinarias e os consumidores. Pela grande extensão do país, eles apresentam grandes comprimentos, como o gasoduto Brasil/Bolívia, que transporta gás de Santa Cruz de la Sierra (Bolívia) a Canoas (Brasil) tem comprimento de 3150 km, passando pelos estados do Mato Grosso do Sul, São Paulo, Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

Apesar de o transporte por tubulações ter uma baixa taxa de acidentes se comparados com outros meios de transporte, acidentes vem chamando a atenção pública pelas consequências que estes provocam, tais como mortes de pessoas, impactos ambientais, perdas econômicas, entre outros (ALVINO, 2003).

Tendo em vista o que foi exposto acima, vários estudos estão sendo aplicados para a verificação da integridade estrutural de tubulações transportadoras de petróleo ou gás natural.

Pela crescente aplicação de END na indústria petroquímica, Qidwai (2009), em sua pesquisa, desenvolveu um sistema autônomo capaz de detectar mudanças nas características do material de tubulações transportadoras de gás, tanto subterrâneas quanto submersas. Para isso, foi aplicado o END de ultrassom e lógica Fuzzy.

No seu trabalho, Law e Luzin (2012), analisaram a integridade e estresses residuais causados por soldagem em tubulações, pois a região da solda consiste em um concentrador de tensões, podendo falhar nessa área. Eles conseguiram determinar o tamanho crítico da fissura provocada pela soldagem em tubulações com espessuras diferentes, uma com 24 mm e outra com 30 mm.

Já Bison *et al.* (2011), aplicaram a técnica de termografia por infravermelho para detectar corrosão em tubulações. Usaram uma fonte aquecedora, uma câmera de

infravermelho e uma tubulação para associar pontos quentes com áreas de corrosão. Ainda aplicaram elementos finitos objetivando otimizar os parâmetros experimentais. Com essa técnica, foram capaz de detectar perdas de espessura com um sistema simples e de fácil uso.

A corrosão é um dos principais fatores que afetam a integridade das tubulações de aço. De acordo com Gentil (2011), corrosão pode ser definida como a deterioração de um material, geralmente metálico, por ação química ou eletroquímica do meio ambiente, associada ou não a esforços mecânicos. As diferentes formas de corrosão são mostradas na Figura 11.

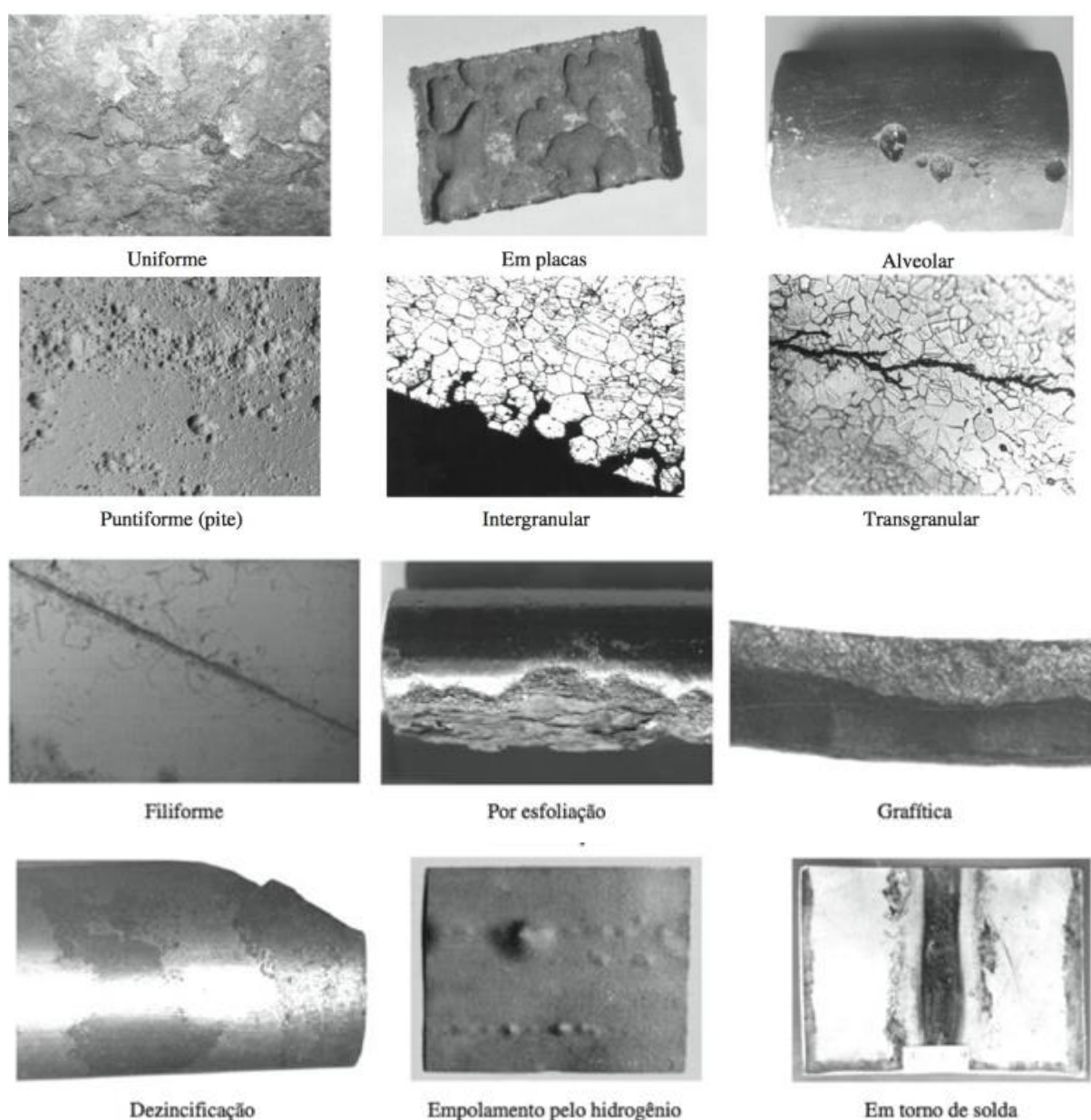


Figura 11 – Formas de corrosão.

Fonte: Gentil (2011), adaptada pelo autor.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No capítulo anterior foi feita uma revisão bibliográfica que dissertou sobre ondas sonoras, princípios do magnetismo, ensaios não destrutivos, com ênfase na técnica de ultrassom e caracterização magnética com uso de sensor Hall, e tubulações do setor petroquímico. As informações e discussões levantadas pelos diversos pesquisadores serviram de referência para o desenvolvimento deste trabalho.

Nesse sentido, a metodologia adotada enfocará o material a ser estudado e o planejamento experimental empregado na pesquisa.

3.1 MATERIAIS

A amostra utilizada foi um duto de aço médio carbono. Ele foi cortado longitudinalmente para a confecção de furos internos de mesmo diâmetro, com mesmo espaçamento entre eles e diferentes profundidades, porém, nenhum deles “passantes”, como indica a Figuras 12.

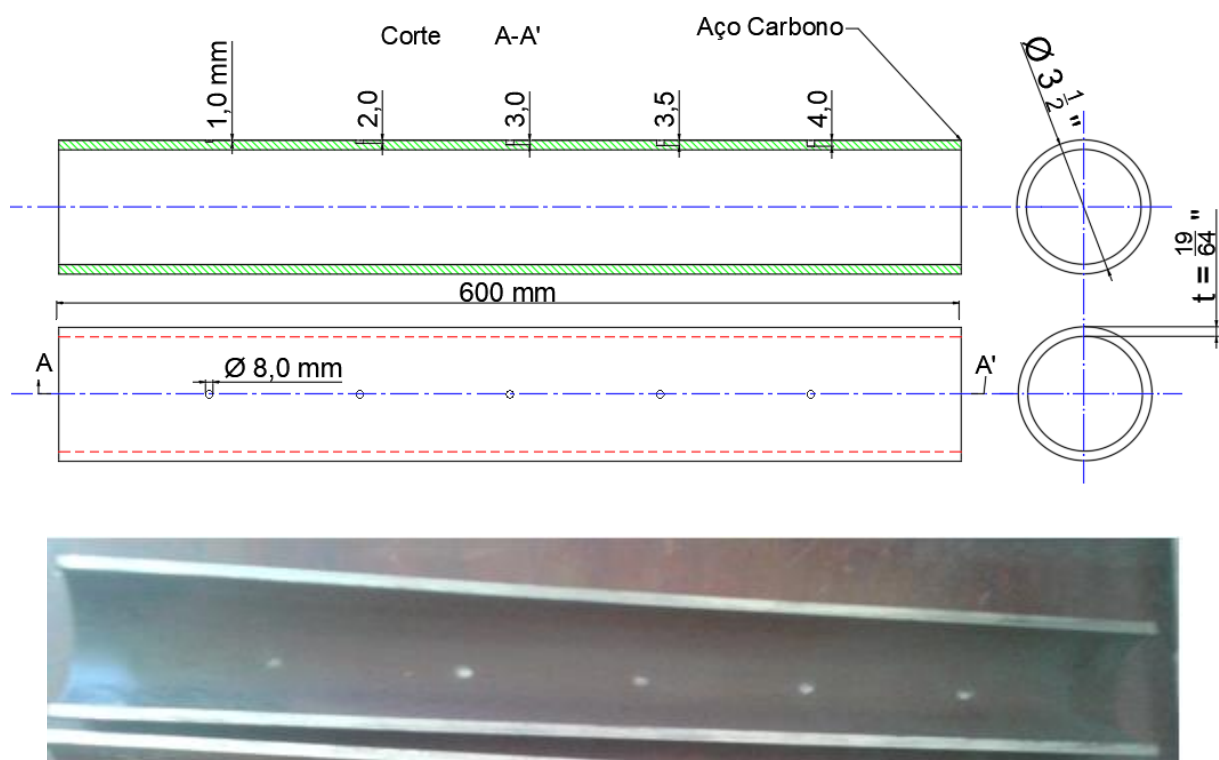


Figura 12 – Duto de aço médio carbono.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Esses furos foram confeccionados com o intuito de simular perdas de espessura em tubulações transportadoras de petróleo e gás natural, como indica a Tabela 7, e verificar a capacidade dos ENDs de ultrassom e sensor Hall em detectar perdas cada vez maiores de espessura.

Tabela 7 – Espessura do duto da Figura 12 nas diferentes regiões de medição.

DUTO DE AÇO MÉDIO CARBONO	
REGIÕES (profundidade do furo)	ESPESSURA DO DUTO (mm)
Sem furo	7,54
1 (1 mm)	6,54
2 (2 mm)	5,54
3 (3 mm)	4,54
4 (3,5 mm)	4,04
5 (4 mm)	3,54

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Para o duto da Figura 12, que possui espessura de 7,54 mm, um furo de 1 mm de profundidade representa espessura final da amostra de 6,54 mm nessa região, evidenciando perda de material. Um furo de 2 mm de profundidade caracteriza uma perda de 2 mm na espessura total do material. Logo, é obtido um valor de 5,54 mm na região deste furo no duto de 7,54 mm de espessura, e assim por diante. A Tabela 7 traduz este raciocínio para o duto da Figuras 12.

3.2 APLICAÇÃO DA ULTRASSOM

Dos mais variados tipos de transdutores ultrassônicos existentes no mercado, foram selecionados dois modelos. Ambos são transdutores para inspeções de contato, um com 5 MHz de frequência e um cristal piezelétrico com diâmetro de 0,5”, e o outro com 2,25 MHz e um cristal piezelétrico com diâmetro de 0,5”. Os dois são da marca *Olympus*. Apresentam as seguintes especificações: Transdutor A109S-RB CON – 5 MHz/.5” e transdutor A106S-RB CON 2.25MHz/.5”.

Com os valores de frequência e sabendo a velocidade do som no aço (Tabela 1) determina-se o comprimento de onda ultrassônica produzido, através da Equação (1).

De acordo com Andreucci (2008), o menor diâmetro de uma descontinuidade a ser detectada deve ser na ordem de $\lambda/2$. O λ produzido pelo transdutor de 5 MHz é de 1,18 mm e de 2,63 mm para o de 2,25 MHz. Sabendo que os diâmetros das descontinuidades são de 8 mm (Figura 12), conclui-se que é possível aplicar estes transdutores para a detecção dos furos e suas diversas profundidades. E, por serem monocristais de contato, permitem a utilização da técnica de pulso-eco, como indica a Tabela 3.

Selecionados os transdutores, a inspeção por ultrassom foi realizada com o Grupo de Pesquisa em Integridade e Inspeção (GPii) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), que dispõe de uma excelente estrutura para desenvolvimento de pesquisas nas áreas de integridade e inspeção. Os equipamentos utilizados foram: dois transdutores de contato (um com 5 MHz/.5" e o outro com 2.25 MHz/.5"), um osciloscópio THS3024, um pulser receiver modelo 5800 da *Olympus*, material acoplante, um computador com o software *MatLab* e o duto para inspeção.

A Figura 13 mostra a configuração experimental do ensaio de ultrassom que foi adotada na etapa de detecção dos furos nos dutos.



Figura 13 – Ensaio Não Destrutivo (END) de ultrassom.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Inicialmente, o glicerol é inserido na superfície externa do duto em estudo, atuando como um acoplante, para evitar a formação de uma camada de ar entre a superfície de contato

do transdutor e do duto, permitindo que as vibrações mecânicas produzidas se propaguem no material.

Em seguida, o transdutor foi aplicado nas regiões sem furo e com furo, através da técnica pulso-eco, objetivando detectar a espessura da peça e as perdas de espessura pela presença de furos com profundidades diferentes. Um exemplo de sinal ultrassônico é mostrado na Figura 14.

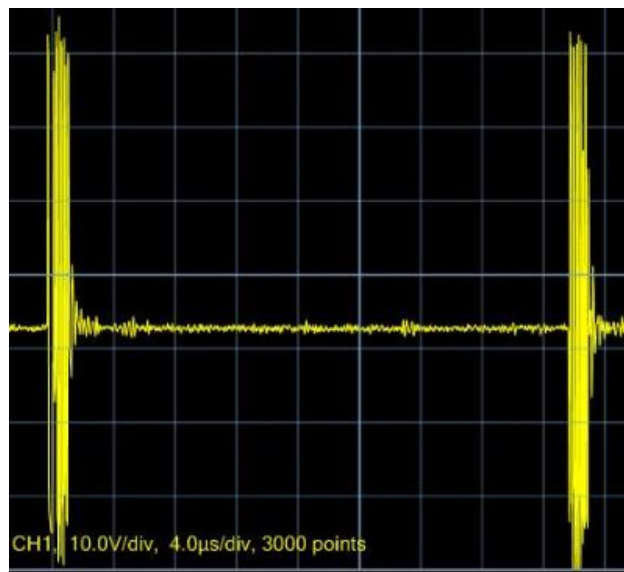


Figura 14 – Exemplo de um sinal ultrassônico.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Com o sinal adquirido, é possível determinar a distância percorrida pela ultrassom no material, uma vez que é conhecida a velocidade de propagação no aço e o tempo que levou para a ultrassom ser transmitida e recebida pelo transdutor. Esse tempo de ida e volta é representado pelo intervalo entre dois picos consecutivos. Com isso, a espessura da seção em análise pode ser determinada.

Visando determinar os erros advindos da medição, principalmente pela dificuldade em localizar os picos corretos e pelo manuseio dos equipamentos por parte do operador, utilizou-se o bloco padrão V1 (DIN 54120-blocoV1 ou BS-2704-bloco A2), como indicado na Figura 15.

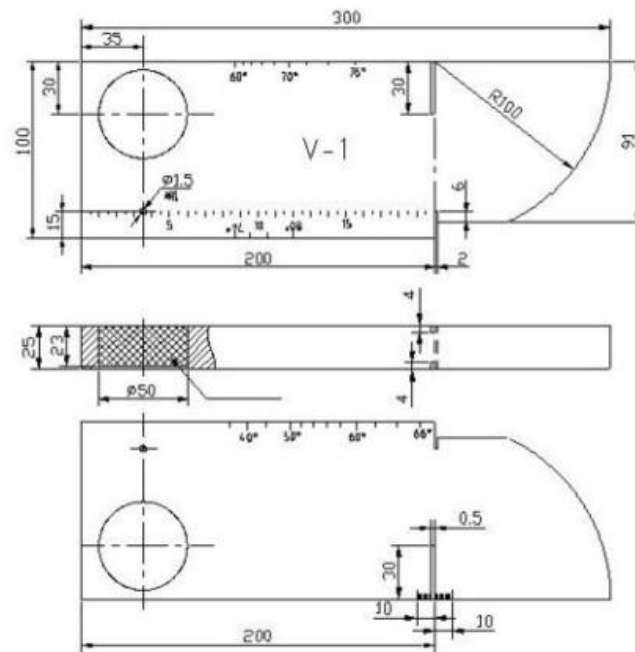


Figura 15 – Bloco de calibração V1.

Fonte HUATEC (2018).

As regiões do bloco padrão que ficaram em contato com o transdutor para aferição das medições são ilustradas na Figura 16. São elas: 1 – Altura de 100 mm; 2 – Altura de 91 mm; 3 – Furo localizado a 15 mm da superfície e circunferência a 45 mm da superfície; 4 – Rebaixos de 85 mm, 91mm e por fim os 100 mm; 5 – Circunferência localizada a 5 mm da superfície. Além da região 6, que representa a espessura do bloco padrão, de 25 mm.

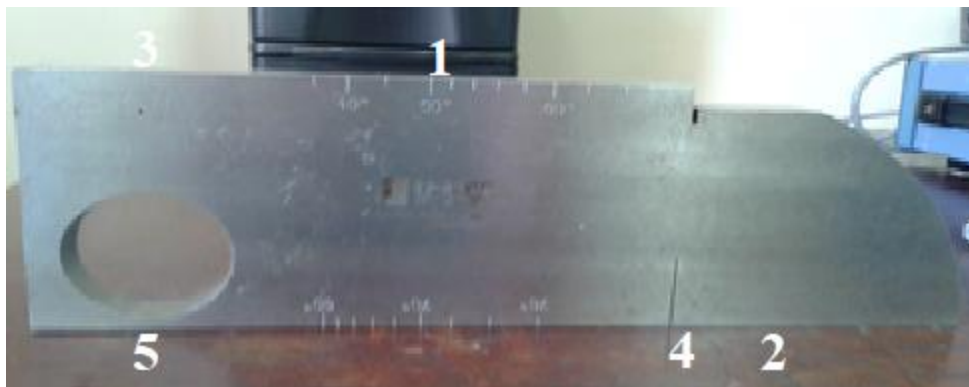


Figura 16 – Bloco padrão V1 e numeração das regiões utilizadas para medição.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

A configuração experimental para análise do bloco padrão é análoga ao apresentado na Figura 13.

3.3 CARACTERIZAÇÃO MAGNÉTICA

Diante de diversas opções diferentes de sensores de efeito Hall existentes no mercado, foi selecionado um modelo com as seguintes especificações: Sensor SS495A fabricado pela *Honeywell*. O fato principal para a escolha deste sensor foi o baixo custo, em torno de 5 reais e a boa compatibilidade de suas características elétricas com os equipamentos existentes em laboratórios acadêmicos.

Dentre muitas aplicações solicitadas para os sensores de efeito Hall, pode-se destacá-los como sensores de deslocamento, de posicionamento angular e medidores de corrente, tendo para isso uma necessidade de alta precisão em um conjunto montado em um pequeno pacote. Os sensores lineares de efeito Hall *Honeywell* SS495A são desenvolvidos para atingir todos estes objetivos. Estes circuitos integrados geram uma tensão de saída proporcional ao campo magnético aplicado. Eles apresentam uma tensão de saída que equivale a 50% da tensão de alimentação quando não estão em presença de campos magnéticos.

O sensor SS495A possui uma sensibilidade de 3,125 mV/G. Outra característica importante está no fato deste dispositivo operar entre temperaturas de -40°C até 150°C .

Com o sensor selecionado, o método de análise de tensão Hall foi realizado por meio de uma ferramenta composta por diversos dispositivos. Todos os ensaios de tensão Hall realizados através desta ferramenta também foram realizados no GPII.

A configuração experimental para o desenvolvimento dos ensaios é constituída de sensores de efeito Hall, um solenoide, um arduíno Mega para aquisição de dados, uma fonte de alimentação de corrente contínua, um computador com o software *LabVIEW*, bem como o duto de aço médio carbono para análise, como indica a Figura 17.



Figura 17 – Configuração experimental do ensaio não destrutivo (END), contendo: computador; arduíno; solenoide; fonte de alimentação (CC); sensor Hall e amostra.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Tal sistema representado na Figura 17 ilustra como foram realizados os diversos ensaios de caracterização de materiais no laboratório.

O sensor de efeito Hall foi fixado na face do núcleo do solenoide, onde o mesmo e a amostra fazem parte do circuito magnético do solenoide. Dessa maneira o fluxo de campo magnético que parte da face do núcleo do solenoide atravessa o sensor hall, a amostra, retornando a outra face do sensor hall. A presença de descontinuidades, mudança microestrutural ou trincas numa determinada região da amostra acarretará numa distorção nas linhas de fluxo magnético que atravessam essa localidade, desse modo o sensor Hall envia sinais de tensão elétrica para uma placa de aquisição de dados proporcionais ao fluxo ou às variações de fluxo de campo magnético que o atravessa. Portanto, para o furo de maior profundidade, espera-se que o campo magnético tenha menor intensidade do que nas regiões sem furo. Esta configuração é ilustrada na Figura 18.



Figura 18 – Sensor Hall fixado na face do núcleo do solenoide.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

A necessidade de obtenção de campos magnéticos lineares e uniformes é de fundamental importância para as análises, pois a possibilidade de fuga do campo magnético pode comprometer os resultados, uma vez que partes das linhas de campo não atravessam completamente a amostra analisada. Por isso, a necessidade do contato direto com a parede do duto a ser analisado, garantindo assim um fluxo linear das linhas de campo magnético, tendo em vista que não haja nenhum *gap* entre o solenoide, sensor e amostra, pois a permeabilidade do ar já poderia interferir nos resultados.

O objetivo principal deste sistema de alinhamento é de analisar o resultado das variações de campo magnético que ocorrem devido à presença dos furos no duto de aço médio carbono analisados através dos sensores de efeito Hall.

Para a realização do ensaio de tensão Hall no duto de aço de médio carbono, os seguintes parâmetros foram estabelecidos na fonte de alimentação do sistema: Corrente: 0,1 A; Tensão: 8,0 V.

3.4 DESENVOLVIMENTO DAS RNAs

As redes neurais artificiais deste trabalho foram desenvolvidas com o auxílio do *MatLab*. Nesse software elas podem ser desenvolvidas por meio de aplicativos específicos (*toolboxes*) com o comando “*nntool*”, que possibilita importar, criar, utilizar e exportar dados de RNAs ou pelo editor (*script*) do mesmo.

Para criar uma RNA é necessário, primeiramente, estabelecer o tipo de aprendizado. No presente trabalho, optou-se por usar o aprendizado supervisionado usando o *backpropagation*, uma vez que, para cada dado de entrada é esperado um determinado valor de saída, com o menor erro possível. Além disso, precisa-se definir os padrões de entrada e de saída, a estrutura da rede, os parâmetros de treinamento, treiná-la e por fim testá-la.

Para o ensaio de ultrassom, os dados de entrada são as distâncias entre os picos e os dados de saída são valores de espessura em milímetros. Já no ensaio com sensor Hall, os dados de entrada são os valores de tensão elétrica, fornecidas pelo sensor, enquanto que os dados de saída são valores de espessura em milímetros.

A estrutura da rede é definida pelo número de camadas, o número de neurônios e as funções de ativação. Os parâmetros de treinamento são definidos de acordo com sua necessidade e aplicação. Eles podem estabelecer o número máximo de épocas de treinamento, o erro desejado, a taxa de aprendizado, tempo máximo (em segundos) para o treinamento, dentre outros.

Tanto para a RNA da ultrassom e do sensor Hall, foram utilizados como parâmetros 1000 iterações e erro desejado tendendo a zero. Quando um ou outro parâmetro são atingidos, o treinamento é encerrado.

Depois de definidos todos esses parâmetros, a RNA é treinada, para então passar pelo processo de testes, pois uma vez treinada, ela possuirá informações e condições apropriadas para aquisição dos resultados.

Com o intuito de adquirir uma RNA capaz de fornecer respostas com o maior grau de precisão, várias medições foram realizadas e várias configurações possíveis foram testadas.

3.4.1 RNA para inspeção por ultrassom

A rede desenvolvida para averiguar as informações do ensaio de ultrassom possui as seguintes características, como ilustra a Figura 19: aprendizado do tipo supervisionado *backpropagation*, com três camadas, sendo uma camada de entrada, uma intermediária, com 30 neurônios e função de ativação do tipo linear, e uma de saída também com função linear e 1 neurônio.

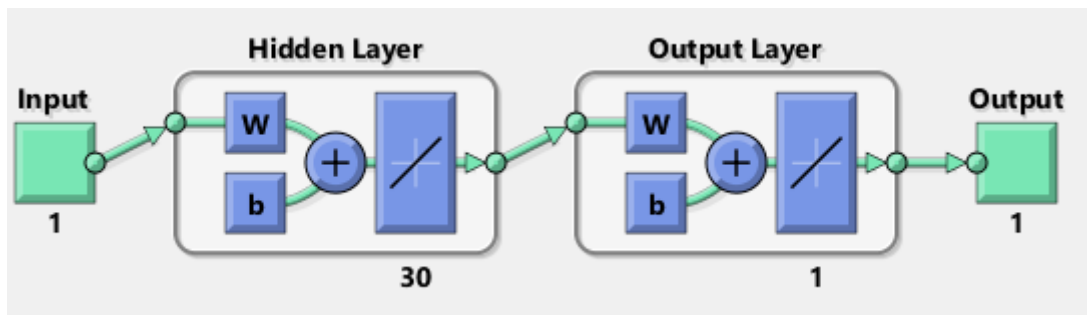


Figura 19 – Modelo da RNA desenvolvida para ensaios de ultrassom.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Com a estrutura da RNA fixada, é necessário treiná-la. Para isso, foi gerado 261 pontos de entrada e de saída através da equação $V = \Delta S / \Delta t$, como ilustra a Figura 20. O intuito de gerar dados para treinamento através da equação e não por via experimental foi fazer a RNA entender a equação, ou seja, ela exercer a função desta equação.

```

v=5920000; %mm/s
d=20; %mm
dt=0.05; %mm

for i=1:1:201
    t=(2*d)/v;
    tv(i)=t;
    dv(i)=d;

    d=d+dt;
end

esp=dv; %espessura (mm)
tv; %tempo (s)

```

Figura 20 – Gerador dos dados de treinamento para ultrassom.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Sabendo da velocidade de propagação do som no aço, fez-se a espessura variar de 20,00 mm até 30,00 mm em intervalos de 0,05 mm, obtendo assim, para cada valor da espessura, um valor do tempo gasto pela ultrassom para percorrer o material, na ida e volta.

Esse intervalo de 20,00 mm a 30,00 mm foi escolhido com o intuito de treinar a RNA com valores de espessura diferentes dos valores a serem analisados, tanto no bloco padrão V1 quanto nos dutos, para verificar sua eficácia. Com esses dados gerados, a RNA foi treinada, obtendo um erro de $3,13 \times 10^{-12}$ em 206 iterações. A validação deste treinamento é mostrada na Figura 21.

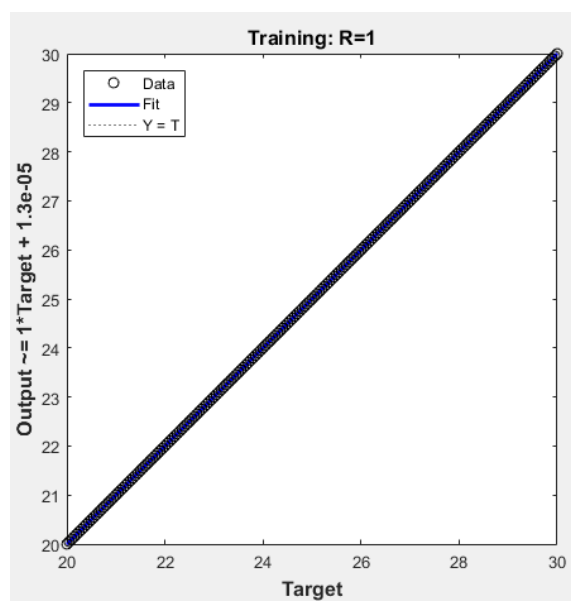


Figura 21 – Comportamento da RNA de ultrassom.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Após o treinamento, foram realizadas inspeções por ultrassom para verificar se a rede apresenta boa performance. A Figura 22 ilustra a interface gráfica desenvolvida para os ensaios de ultrassom usando RNAs.

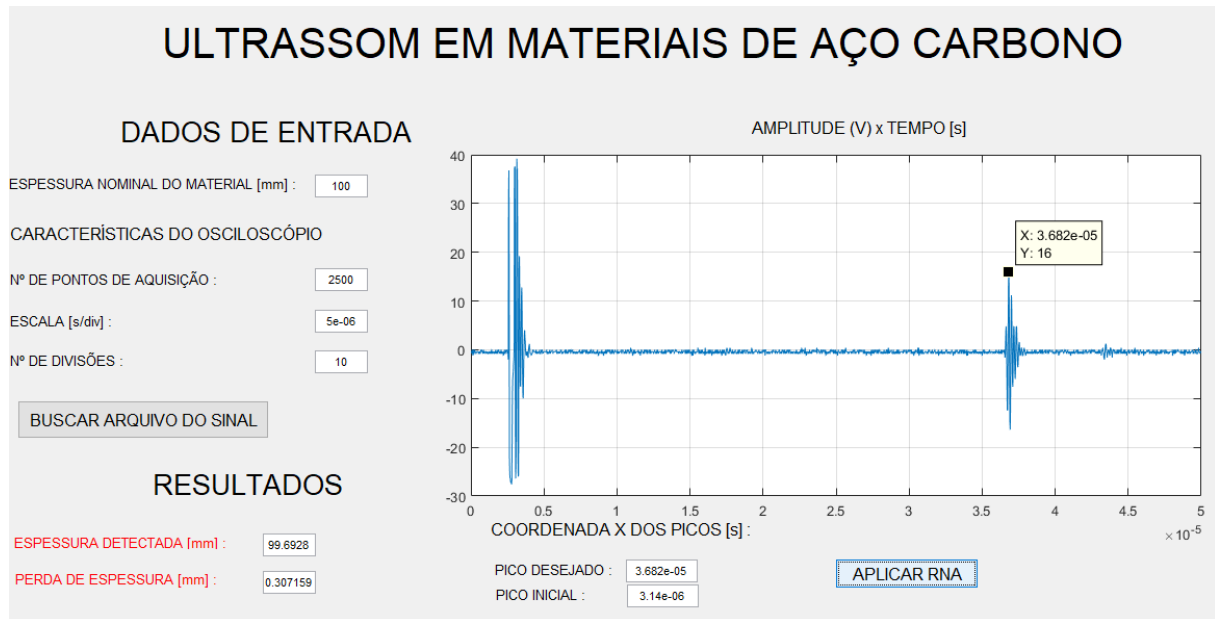


Figura 22 – Interface gráfica para inspeção por ultrassom com uso de RNA.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Esta interface tem o intuito de facilitar a inspeção e a utilização da RNA por parte do operador, além de tornar a aquisição de dados mais rápida.

3.4.2 RNA para inspeção usando sensor Hall

A rede desenvolvida para averiguar as informações do ensaio de caracterização magnética usando sensor Hall apresenta as mesmas características da RNA desenvolvida para ultrassom (Figura 19), ou seja, apresenta aprendizado do tipo supervisionado *backpropagation*, com três camadas, sendo uma camada de entrada, uma intermediária, com 30 neurônios e função de ativação do tipo linear, e uma de saída também com função linear e 1 neurônio.

Com a estrutura da RNA fixada, é necessário treiná-la. Para isso, foram realizadas inspeções no duto de aço médio carbono, visando adquirir o comportamento da variação da tensão em função da espessura final desejada, como indica a Figura 23.

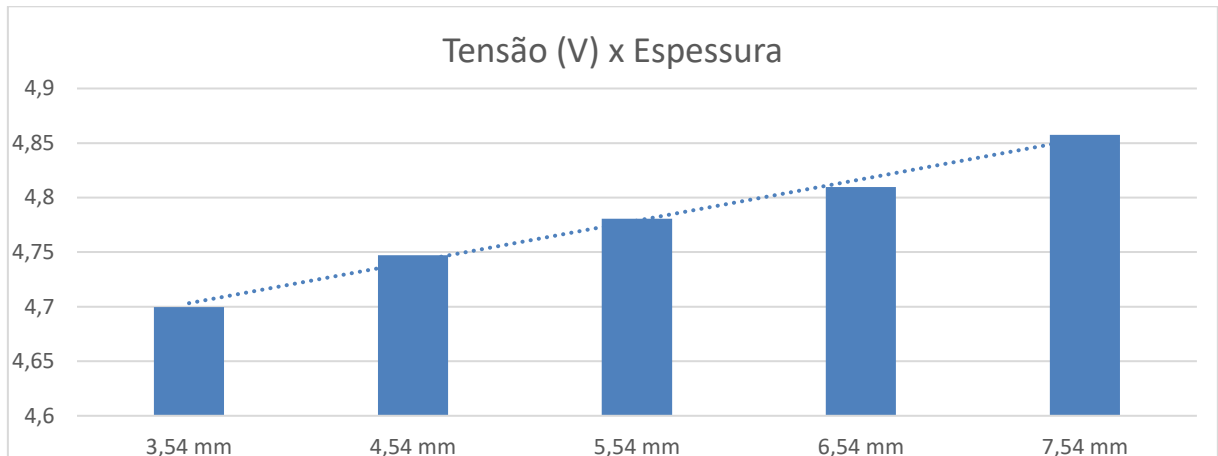


Figura 23 – MMQ para informações do sensor Hall.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Com as informações da Figura 23, pode-se aplicar o Método de Mínimos Quadrados (MMQ) para determinar o comportamento linear do sensor. A equação obtida foi $y = 0,0378x + 4,5693$. Sendo y a tensão em Volts e x a espessura do material em milímetros.

Logo, esta equação foi utilizada para gerar 261 pontos de entrada e de saída, como ilustra a Figura 24. O intuito de gerar dados para treinamento através da equação e não por via experimental foi fazer a RNA entender a equação, ou seja, ela exercer a função desta equação.

```

esp=10;           %mm
d_esp=0.05;       %mm

for i=1:1:201
    tensao=(0.0378*esp)+4.5693
    tensaotv(i)=tensao;
    esptv(i)=esp;

    esp=esp+d_esp;
end

esptv;    %espessura (mm)
tensaotv; %tensão (V)

```

Figura 24 – Gerador dos dados de treinamento para sensor Hall.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Fez-se a espessura variar de 10,00 mm até 20,00 mm em intervalos de 0,05 mm, obtendo assim, para cada valor da espessura, um valor da tensão elétrica.

Esse intervalo de 10,00 mm a 20,00 mm foi escolhido com o intuito de treinar a RNA com valores de espessura diferentes dos valores a serem analisados, para verificar sua eficácia. Com esses dados gerados, a RNA foi treinada, obtendo um erro de $8,46 \times 10^{-13}$ em apenas 3 iterações. A validação deste treinamento é mostrada na Figura 25.

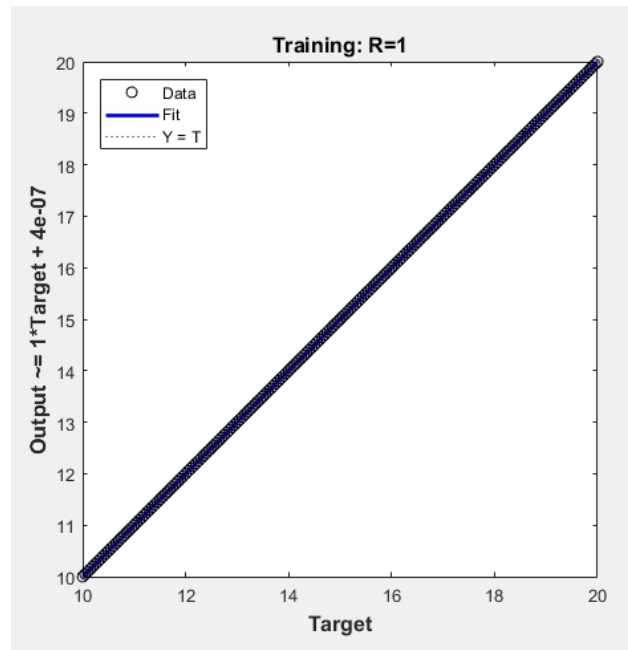


Figura 25 – Comportamento da RNA para sensor Hall.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Após o treinamento, foram realizadas inspeções para verificar se a rede apresenta boa performance. A Figura 26 ilustra a interface gráfica desenvolvida para os ensaios com sensor Hall usando RNAs.

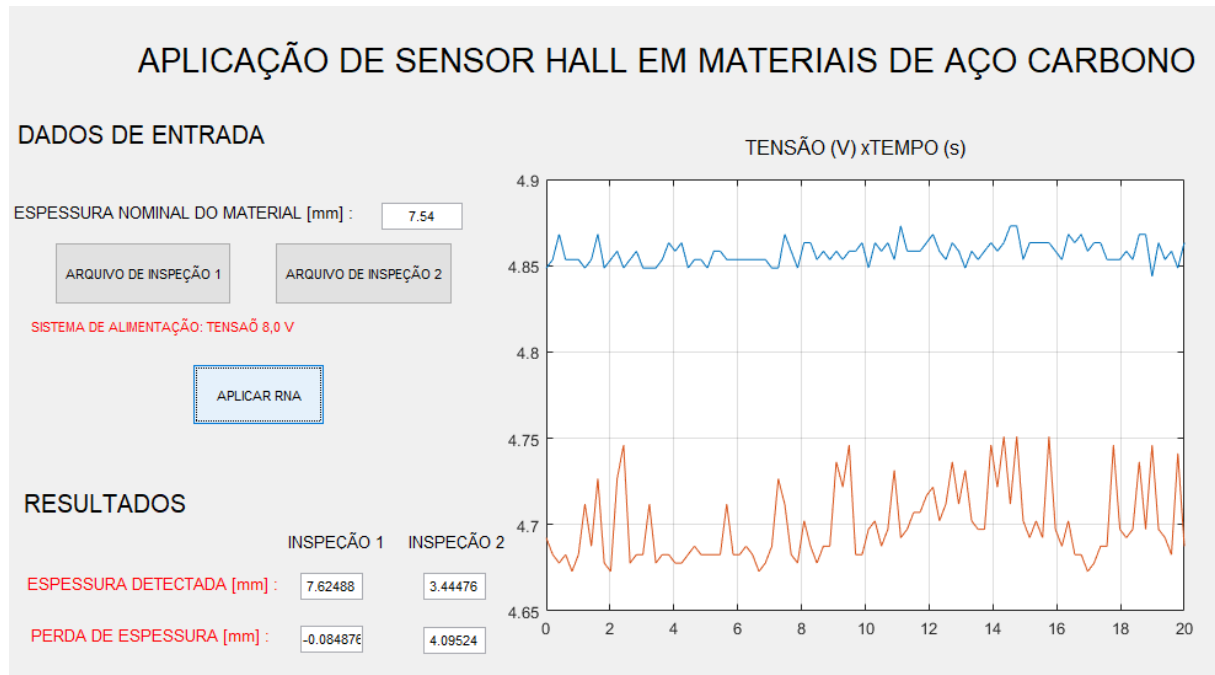


Figura 26 – Interface gráfica para inspeção por sensor Hall com uso de RNA.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Esta interface tem o intuito de facilitar a inspeção e a utilização da RNA por parte do operador, além de tornar a aquisição de dados mais rápida.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção apresenta os resultados dos ensaios realizados na amostra (duto) tanto pela técnica de ultrassom como usando sensor Hall. Além de mostrar as características das RNAs criadas.

4.1 INSPEÇÃO POR ULTRASSOM

As inspeções no bloco padrão V1 foram realizadas conforme descrito na seção 3.2.2.2, Figura 16, com o objetivo de adquirir o conhecimento sobre o erro presente nas medições. Com essa finalidade, obteve-se a média e o desvio padrão para 10 medições nas 6 regiões distintas, como indica a Tabela 8. Essas medições foram feitas sem RNA.

Tabela 8 – Inspeção do bloco padrão V1 pela técnica de ultrassom.

ESPESSURA (mm)				
Regiões	Média das Medições	Valor Esperado	Média dos Erros	Desvio Padrão dos Erros
1	100,16	100,00	0,25	0,09
2	90,97	91,00	0,22	0,18
3	14,71	15,00	0,40	0,23
	45,42	45,00	0,51	0,30
4	84,91	85,00	0,40	0,38
	90,88	91,00	0,32	0,23
	100,21	100,00	0,43	0,25
5	4,87	5,00	0,35	0,23
6	25,08	25,00	0,13	0,09

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Exemplos de sinais ultrassônicos obtidos pela inspeção do bloco padrão V1 podem ser verificados na Figura 27. Percebe-se, pela análise da Figura 27, que os picos iniciais, representados por I, são devidos à emissão da onda ultrassônica. Depois de percorrido certo tempo, outro conjunto de picos aparece, indicado por II, que representa a localização da superfície oposta à medição, ou seja, indica a espessura do bloco padrão V1.

Já na Figura 27 (b) o conjunto de picos representados por III e IV indicam a presença de superfícies entre a emissão das ondas e a espessura do bloco, representando a identificação de outras superfícies. A Figura 27 (a) caracteriza a região 1 e a Figura 27 (b) caracteriza a região 4 da Tabela 8.

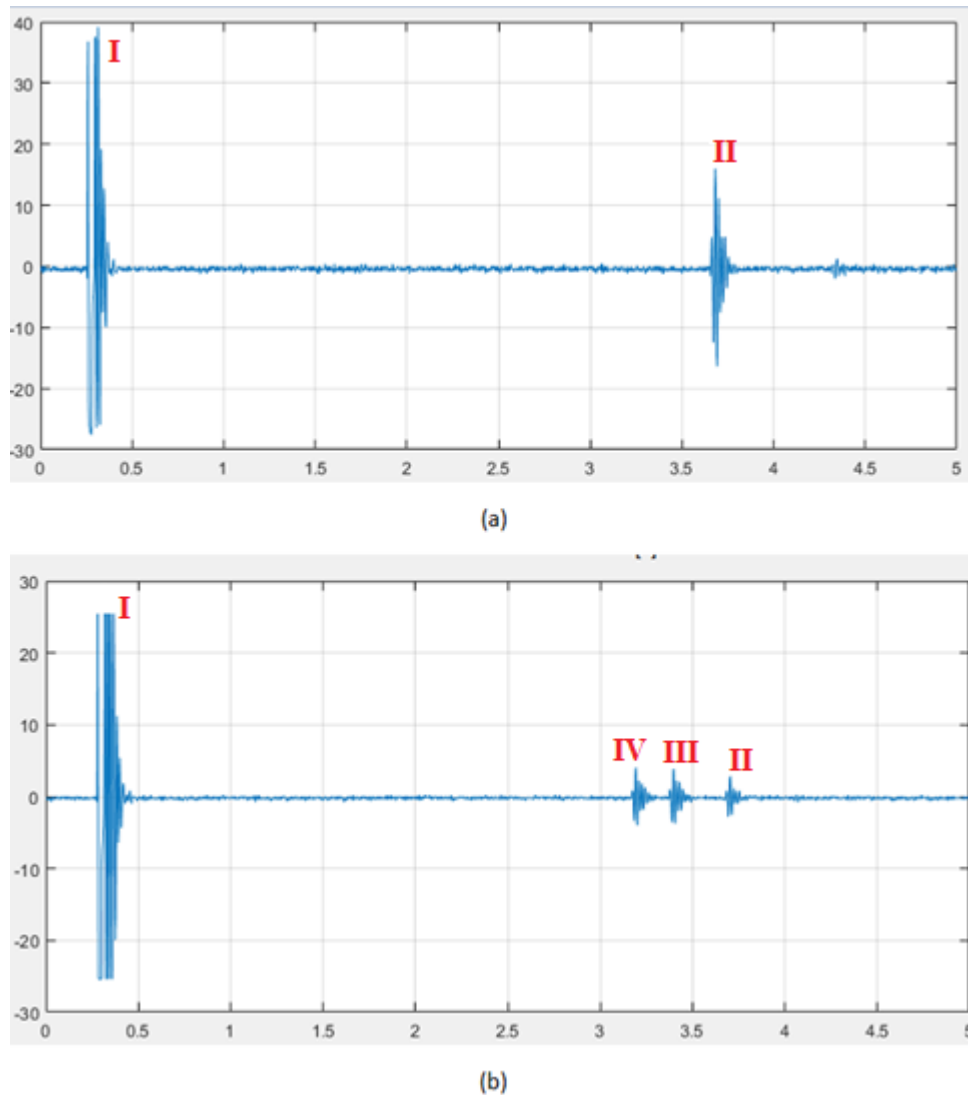


Figura 27 – Sinal de ultrassom Amplitude (V) x Tempo (μ s) do bloco padrão V1. (a) Sinal da espessura de 100 mm e (b) picos das espessuras de 85, 91 e 100 mm.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Com o conhecimento da Tabela 8, pode-se executar a RNA para o duto, sabendo-se que existe um erro presente no sistema. Esse erro pode estar associado a erros de medição, como o posicionamento incorreto dos transdutores, dificuldade em detectar os picos corretos, dentre outros fatores.

Quanto menor a espessura da parede do duto, mais difícil é a inspeção por ultrassom, devido a extensão do campo próximo, de 32,15 mm para o transdutor de 5 MHz e de 15,32 mm para o transdutor de 2,25 MHz, obtida pela Equação (11).

Como o campo próximo é menor no sensor de 2.25 MHz, optou-se por usá-lo na inspeção do duto de aço de médio carbono. Outro fator que dificultou a aplicação da técnica de pulso-eco nos dutos é a inclinação da superfície, atrapalhando o contato completo da superfície do transdutor com a superfície do duto. Exemplos de sinais ultrassônicos obtidos na inspeção do aço médio carbono são mostradas na Figura 28.

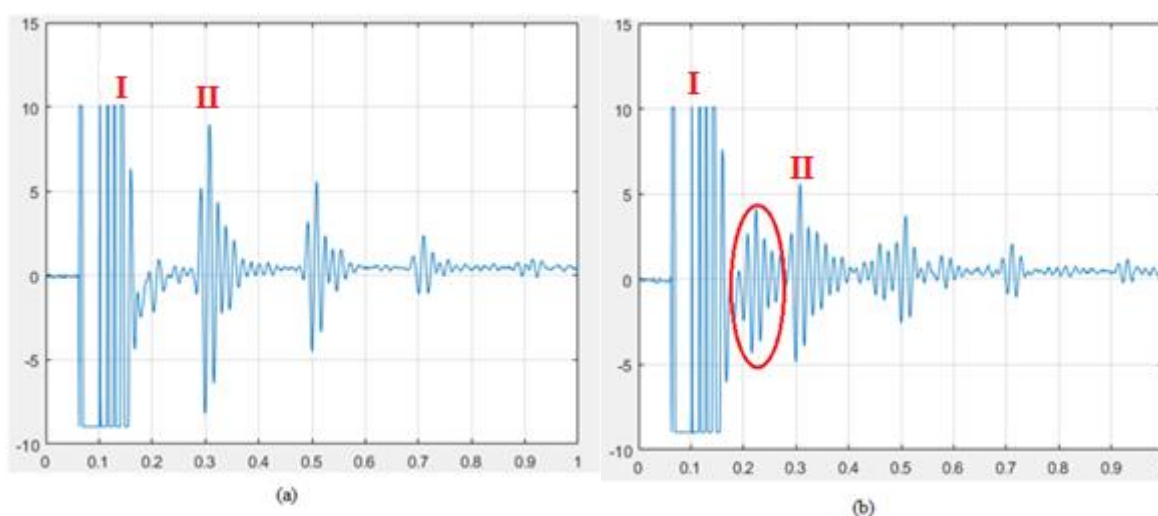


Figura 28 – Sinal de ultrassom Amplitude (V) x Tempo (μ s) do duto de aço médio carbono. (a) Sinal sem furos e (b) pico de um furo circulado em vermelho.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Percebe-se que, de maneira análoga à Figura 27, os picos representados por I e II na Figura 28 representam a emissão da onda ultrassônica e a localização da superfície oposta à medição, respectivamente.

Já na Figura 28 (b) o conjunto de picos circulado em vermelho indica a presença de uma superfície entre a emissão das ondas e a espessura da amostra, representando descontinuidades internas. Quanto mais próxima da superfície os furos se encontrarem, mais é difícil sua identificação.

Com isso, os resultados da RNA para a inspeção por ultrassom do duto de aço médio carbono são mostrados na Tabela 9. Também foram feitas 10 medições, para determinação da média e desvio padrão. As inspeções foram executadas seguindo as informações da Tabela 7, aplicando os transdutores nas regiões com e sem furos.

Tabela 9 – Resultados obtidos pela RNA usando o ensaio por ultrassom no duto de médio carbono.

ESPESSURA (mm)				
Regiões	Média das Medições	Valor Esperado	Média dos Erros	Desvio Padrão dos Erros
Sem furo	7,24	7,54	0,30	0,05
1	6,23	6,54	0,28	0,07
2	5,29	5,54	0,25	0,02
3	4,31	4,54	0,23	0,04
4	3,84	4,04	0,20	0,03
5	3,42	3,54	0,13	0,06

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Pela comparação da Tabela 9 com a Tabela 8, percebe-se que os erros obtidos pela RNA são admissíveis, uma vez que a medição do bloco padrão apresentou um erro máximo de 0,51 mm, enquanto que a RNA apresentou um erro máximo de 0,30 mm para o duto de aço médio carbono. Outra observação importante é a verificação da dificuldade em se inspecionar pequenas espessuras, por causa da região do campo próximo, além da complicação de selecionar e identificar os picos à medida que os furos vão se aproximando da superfície.

4.2 INSPEÇÃO COM SENSOR HALL

Primeiramente, foram feitas 10 medições para obtenção da média dos valores de tensões para cada região da Tabela 7, com exceção do furo 4, ou seja, sem verificar a presença de furo com 3,5 mm e espessura do duto de 4,04 mm, como indica a Tabela 10. Este ponto será analisado exclusivamente com a RNA, visando visualizar a capacidade da rede de identificar pontos sem nenhuma informação precedente.

Pela análise da Tabela 10, percebe-se que à medida que a espessura final diminui de 1,0 mm, a tensão varia na escala de miliVolts. Essa variação possibilita a identificação da perda de espessura do material. Para cada medição, o sinal foi salvo a cada 20 s.

Tabela 10 – Valores de tensões esperadas para diferentes espessuras.

Regiões	Valor Esperado de Espessura (mm)	Média das Tensões (V)	Desvio Padrão das Tensões
Sem furo	7,54	4,8575	0,0065
1	6,54	4,8096	0,0090
2	5,54	4,7805	0,0122
3	4,54	4,7473	0,0141
5	3,54	4,6995	0,0219

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Estes resultados podem ser visualizados com maior facilidade na Figura 29, que indica os valores de tensão para os casos extremos, ou seja, para a região sem furo (7,54 mm) e para a região com maior perda de espessura (3,54 mm).

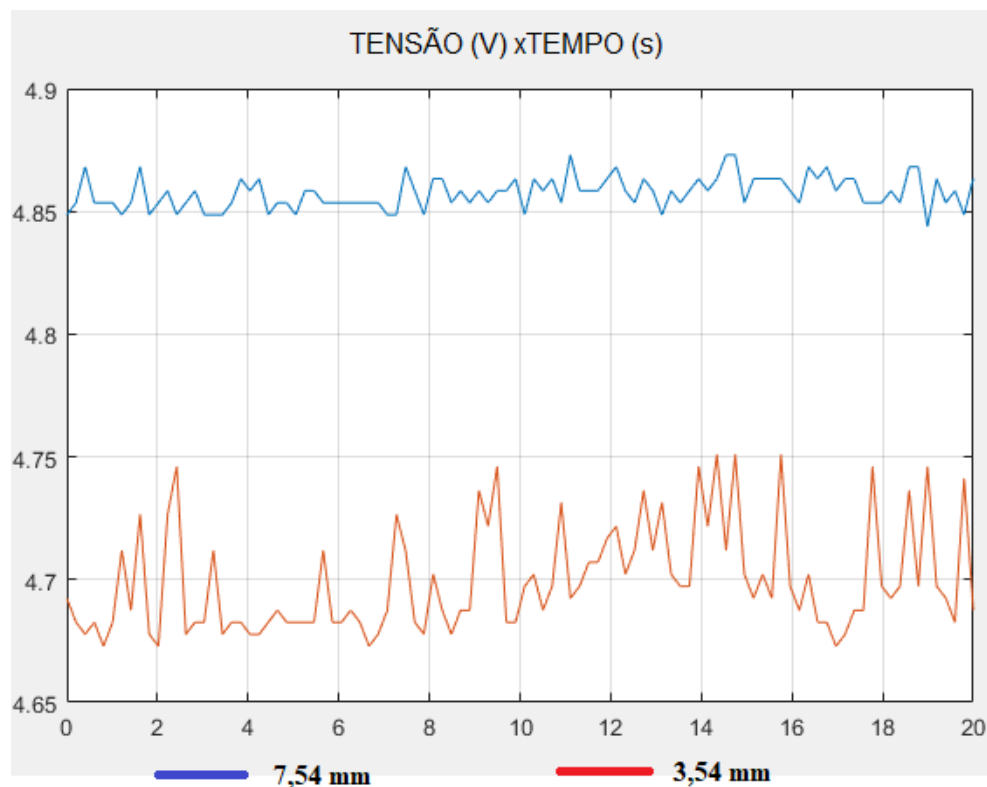


Figura 29 – Sinal obtido pelo sensor Hall no duto de aço médio carbono em 20 s.

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Por fim, a RNA para a inspeção por caracterização magnética usando sensor Hall foi utilizada no duto de aço médio carbono. Seus resultados são mostrados na Tabela 11. Foram realizadas 10 medições, para obtenção da média e desvio padrão. As inspeções foram

executadas seguindo as informações da Tabela 7, aplicando o sensor nas regiões com e sem furos.

Tabela 11 – Resultados obtidos pela RNA usando o ensaio com sensor Hall no duto de médio carbono.

ESPESSURA (mm)				
Furos	Média das Medições	Valor Esperado	Média dos Erros	Desvio Padrão dos Erros
Sem furo	7,57	7,54	0,13	0,11
1	6,37	6,54	0,20	0,11
2	5,46	5,54	0,18	0,12
3	4,56	4,54	0,14	0,07
4	4,06	4,04	0,10	0,05
5	3,30	3,54	0,29	0,15

Fonte: Produzida pelo autor (2018).

Pela análise da Tabela 12, percebe-se que o maior erro obtido foi em torno de 0,29 mm. Como a inspeção foi executada de maneira manual, qualquer movimento do operador interfere no resultado final. Logo, admitindo que um percentual deste erro é devido ao processo de medição em si, pode-se inferir que a RNA teve capacidade de detectar os furos e determinar a espessura final do material.

5 CONCLUSÃO

O estudo proposto permite inferir que os ENDs tanto de ultrassom quanto de caracterização magnética com sensor Hall foram capazes de determinar a presença ou não dos furos no duto de aço médio carbono e localizá-los, indicando a espessura final do material, já considerando a perda de material devido à profundidade dos furos não “passantes”.

A aplicação de dois tipos de ENDs para uma mesma aplicação e para o mesmo duto permitiu verificar a necessidade crescente de se utilizar mais de um END, tendo em vista que uma técnica serve de suporte para a outra e vice-versa, proporcionando inspeções mais acuradas.

O ensaio por ultrassom, em comparação com a aplicação de sensor Hall, apresenta como vantagem o fato de poder ser aplicado em praticamente qualquer tipo de material, entretanto, como desvantagem apresenta um custo de aquisição elevado, também apresenta um custo operacional oneroso, tendo em vista que precisam ser realizados por técnico qualificado, e tem dificuldade para medição de materiais com espessuras finas. Já a técnica com sensor Hall, apresenta como vantagens o baixo custo de aquisição, elevada sensibilidade de inspeção, entretanto só pode ser aplicado em materiais ferromagnéticos. Por outro lado, ambas as técnicas exigem um certo grau de conhecimento por parte do operador, principalmente no que se refere à interpretação dos dados obtidos.

Nesse contexto, cada vez mais as RNAs estão sendo aplicadas com ENDs com a finalidade de facilitar a operação de inspeção, principalmente no que diz respeito às análises dos sinais e aquisição dos resultados.

As RNAs desenvolvidas no presente trabalho apresentaram erro inferior a 1 mm. Além disso, a metodologia de treinar as redes a partir de equações lineares mostrou-se promissora, uma vez que elas entenderam a equação e passaram a exercer a função das equações.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- a) Desenvolver um sistema de medição automático, que seja capaz de percorrer toda a superfície de análise, por mais irregular que seja, armazenar as informações e que forneça respostas de uma maneira mais precisa possível;
- b) Aplicar lógica Fuzzy para determinar o grau de criticidade fornecida pelo dano em tubulações transportadoras de petróleo e gás natural, usando normas API para inspeção baseada no risco, tendo como dados de entrada a inspeção realizada por meio de ENDs e os dados fornecidos pelas RNAs desenvolvidas neste trabalho;
- c) Verificar a influência de superfícies galvanizadas no comportamento das ondas sônicas e do campo magnético, visando a aplicação de ENDs em dutos galvanizados.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, P. D.; “Inspeção por Ultrassom de Juntas Adesivas de Tubulações em Materiais Compósitos”. **Monografia, UFRJ/ Escola Politécnica**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 65 p., 2011.
- ALVINO, A. E. I.; “Aplicação da Lógica Nebulosa ao Modelo Muhlbauer para Análise de Risco em Dutos”, **Tese de doutorado, PUC-Rio**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 202p., 2003.
- AMORIM, A. J.; “Desenvolvimento de Uma Rede Neuro-Fuzzy para a Previsão da Carga”, **Dissertação de mestrado, UNESP**, Ilha Solteira, SP, Brasil, 98p., 2015.
- ANDREUCCI, R. **Aplicação Industrial: Ensaio por Ultra-som**, ed. Jul./2008, LTDA, 2008.
- ANP, Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis 2017, Agência Nacional do Petróleo, Rio de Janeiro, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO DESTRUTIVOS E INSPEÇÃO - ABENDI. **Guia ABENDI 2018: Ensaios Não Destrutivos e Inspeção**, 2018
- BARRETO, J. M.; **Introdução às Redes Neurais Artificiais**. UFSC, Florianópolis, SC, Brasil, 2002
- BISON et al. “Corrosion Detection on Pipelines by IR Thermography”. **Proc. SPIE, Thermosense: Thermal Infrared Applications XXXIII**. Vol. 8013, p.80130F1-80130F10, 2011.
- CALLISTER JR, W.D; in: SOARES, S.M.S. (trad.), **Ciência e Engenharia de Materiais: Uma Introdução**, 9ª ed., LTC, Rio de Janeiro, 2018.
- CONDE, M. J. M.; LIÑÁN, C. R.; HITA, P. R. “Use of Ultrasound as a Nondestructive Evaluation Techniques for Sustainable Interventions on Wooden Structures”. **Building and Environment**. Vol. 82, p. 247-257, 2014.
- CAVALCANTE, A. F.; GADELHA, O. S.; BORGES F.F.; SANTOS, N. C.; SILVA, E. M.; Utilização de Sensor de Efeito Hall para Caracterização de Microestruturas. In: **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica – CONEM**, Salvador-BA, Brasil, 2008
- DUARTE, M. A.; MACHADO, J. C.; PEREIRA, W. C. A. “Método para Classificação de Ecos Reais e de Reverberação em Meios Homogêneos, Multicamadas”. **Revista Brasileira de Engenharia Biomédica**. Vol. 15, n. 3, p. 159-174, 1999.
- FREEMAN, J. A.; SHAPURA, D. M.; **Neural Networks: Algorithms, Applications, and Programming Techniques**. 1ed., ADDISON-WESLEY, 1991.
- FRESEMAN et al “Nondestructive Monitoring of Subsurface Damage Progression in Concrete Columns Damaged by Earthquake Loading”. **Engineering Structures**. Vol. 114, p. 148-157, 2016.
- GAO, M.; YIN, L.; NING, J.; “Artificial Neural Network Model for Ozone Concentration Estimation and Monte Carlo Analysis”. **Atmospheric Environment**. Vol. 184, p. 129-139, 2018.
- GENTIL, V.; **Corrosão**. 6ed. LTC, 2011.
- HALLIDAY, D., RESNICK, R.; WALKER, J. in: BIASI, R. S. (trad.), (a) **Gravitação, Ondas e Termodinâmica**, 10ª ed., v.2, LTC, Rio de Janeiro, 2016.

- HALLIDAY, D., RESNICK, R.; WALKER, J. in: BIASI, R. S. (trad.), (b) **Eletromagnetismo**, 10ª ed., v.3, LTC, Rio de Janeiro, 2016.
- HAYKIN, S.; **Neural Networks and Learning Machines**, ed. 3, PEARSON, 2008.
- HUATEC GRUPO CORPORAÇÃO. **A Calibração Ultra-sônica do Detector da Falha/UT obstrui o tipo IIW V1 (A2)**. Disponível em: < <http://portuguese.ndttester.com/sale-7640154-ultrasonic-flaw-detector-ut-calibration-blocks-iiw-v1-a2-type.html>>. Acesso: 06 de jun. 2018
- JIANG et al. “Predicting Concrete Corrosion of Sewers Using Artificial Neural Network”. **Water Research**. Vol. 92, p. 52-60, 2016.
- JUN, J.; CHOI, M.; LEE, J.; “Nondestructive Evaluation of Austenitic Stainless Steel Using CIC-MFL and LIHAS”. **IEEE Transactions on Magnetics**. Vol. 47, n. 10, p. 3959-3962, 2011.
- KAMINSKI, P. C., “Um Sistema de Diagnóstico de Falhas Estruturais Baseado em Redes Neurais Artificiais e Frequências Naturais”. **Tese de Doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo**, São Paulo, Brasil, 139p., 1997.
- KOSMAS et al. “Non-destructive Evaluation of Magnetic Metallic Materials Using Hall Sensors”. **Journal of Materials Processing Tech**. Vol. 92, n. 1, p. 359-362, 2005.
- LAW, M.; LUZIN, V.; “Measured Residual Stresses and Integrity of Pipeline Girth Welds”. **Science & Technology of Welding & Joining** Vol. 17, n. 8, p. 694-698, 2012.
- MATSUNAGA, V. Y.; **Curso de Redes Neurais Utilizando o MatLab**. Belém, PA, Brasil, 2012
- MISHINA et al. “Desenvolvimento de um Sistema Especialista para Avaliação de Risco em Oleodutos on shore em função da corrosão”. In: **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**, Salvador, Brasil, 2008.
- QIDWAI, U. A.; “Autonomous Corrosion Detection in Gas Pipelines: A Hybrid-Fuzzy Classifier Approach Using Ultrasonic Nondestructive Evaluation Protocols”. **IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control** Vol. 52, n. 12, p. 2650-2665, 2009.
- RAMSDEN, E.; **Hall-Effect Sensors: Theory and Application**, 2ed., NEWNES, 2006.
- REVISTA DO PARAFUSO. **Ensaio Não Destrutivo: Uma Visão Geral**. Disponível em: <<http://www.revistadoparafuso.com.br/v1/modelo/noticia.php?id=67>>. Acesso: 31.mai.2018.
- REZENDE, E. J. O.; CRUZ, J. G. S.; MELO, J. C.; **Ensaio Não Destrutivo Por Ultrassom**, XV INIC/ XI EPG/ V INICJr, São José dos Campos, 2011
- SAMBATH, S.; NAGARAJ, P.; SELVAKUMAR, N.; “Automatic Defect Classification in Ultrasonic NDT Using Artificial Intelligence”. **Journal of Nondestructive Evaluation**. Vol. 30, 1ed, p. 20-28, 2011.
- SANTIN, J. L.; **Ultra-som: Técnica e Aplicação**, 2ª ed, LTDA, Curitiba, 2003.
- ALMEIDA, P. D.; 2011. “Inspeção por Ultrassom de Juntas Adesivas de Tubulações em Materiais Compósitos”. **Monografia, UFRJ/ Escola Politécnica**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 65 p.
- SILVA, B. P.; “Avaliação de Falhas em Revestimentos Anticorrosivos pelo Método de Ensaio Não-Destrutivo por Ultra-som”. **Monografia, UFRJ/ Escola Politécnica**, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 85 p., 2011.

SILVA, I. N.; SPATTI, D. H.; FLAUZINO, R. A.; **Redes Neurais Artificiais para Engenharia e Ciências Aplicadas**. São Paulo, 2010

SIMAS FILHO et al. “Decision Support System for Ultrasound Inspection of Fiber Metal Laminates Using Statistical Signal Processing and Neural Network”. **Ultrasonics** Vol. 53, p. 1104-1111, 2013.

ZHENG XU et al. “Corroded Pipeline Failure Analysis Using Artificial Neural Network Scheme”. **Advances in Engineering Software**. Vol. 112, p. 255-266, 2017.